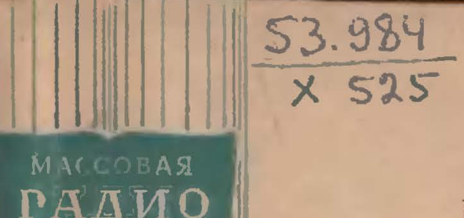
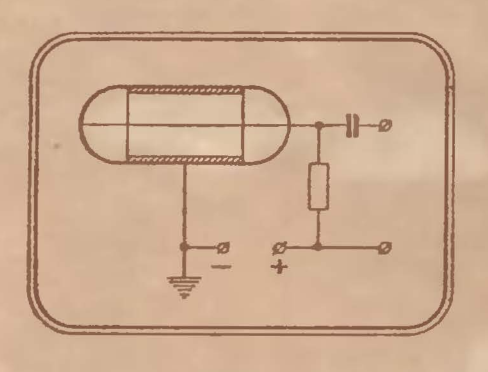


МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

В. А. ХИТУН

СЧЕТЧИКИ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ и СЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 338

В. А. ХИТУН

СЧЕТЧИКИ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В брошюре излагаются принципы действия различных типов счетчиков ядерных частиц и основные физические процессы, происходящие в них. Рассматриваются основные элементы схем современных счетных устройств и методы пересчета. Приводятся справочные данные о некоторых выпускаемых нашей промышленностью счетчиках и фотоумножителях.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся возможностью использования счетчиков в технике и народном хозяйстве. Приводимые справочные сведения могут иметь ценность и для специалистов.

СОДЕРЖАНИЕ

Хитун Всеволод Андреевич

Счетчики ядерного излучения и счетные устройства

Редактор *Ю. А. Сагайдачный* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 18/II 1959 г. Подписано к печати 13/V 1959 г.
Т-05586 Бумага 84×108 1/32 3,7 печ. л. Уч.-изд. л. 4,4
Тираж 42 000 экз. Цена 1 руб. 75 к. Заказ 108

Типография Госэнергоиздата, Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Реальная перспектива использования человеком огромных энергий, скрытых в недрах атома, появилась впервые в 1939 г. Прошло всего 20 лет, но за это время ядерная физика столь бурно и успешно развивалась, что сейчас ее идеи, методы, приложения настолько проникают во все области науки, промышленности, сельского хозяйства и быта, что никто уже не сомневается, что человечество вступило в атомный век.

Широкое практическое применение получают различного рода ядерные излучения, несмотря на то, что общеизвестно их «коварство». Они опасны для организма человека и в то же время неощущаемы. Поэтому для обнаружения и для измерения ядерных излучений необходимы специальные приборы.

Основной частью приборов для регистрации ядерных излучений является элемент, воспринимающий излучения,— детектор излучения[1]. Для этой цели используются счетчики различных типов, позволяющие зарегистрировать попавшую в него частицу в виде кратковременного электрического тока — импульса. Наиболее широкое применение имеют газоразрядные счетчики, работа которых основана на ионизирующем действии ядерного излучения. Постепенно их начинают вытеснять более совершенные сцинтилляционные счетчики, действие которых основано на регистрации вспышек света (сцинтилляций), возникающих в некоторых веществах под ударами частиц.

[1] Здесь в отличие от обычного для радиолюбителей понимания детектора как выпрямляющего элемента это слово будет употребляться главным образом в смысле обнаружителя, индикатора.

Чтобы не только обнаружить ядерное излучение, но и измерить его интенсивность, недостаточно одного детектора излучения. Необходимы еще электронные устройства, подсчитывающие число электрических импульсов, т. е. число попавших в счетчик частиц, и устройства, показывающие результат подсчета. Эти устройства получили наименование *счетных*.

К их числу следует отнести радиометры различных типов, которые применяются для определения активности радиоактивных препаратов и поглощающих свойств различных сред для исследований по методу «меченых атомов» и т. п.

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКАХ

Понятие об устройстве газоразрядного счетчика[1]. Счетчиком может быть любой газонаполненный прибор, поставленный в режим работы, обеспечивающий регистрацию попадания ядерной частицы по возникновению разрядного тока.

По своему устройству счетчик является своеобразным конденсатором. Как всякий конденсатор счетчик состоит

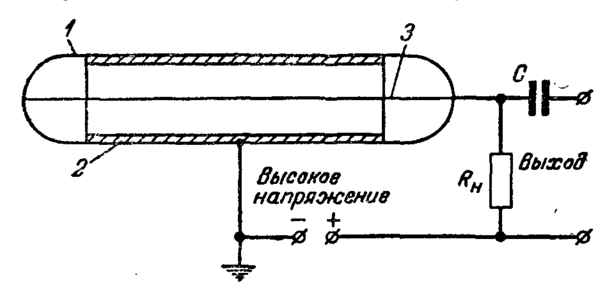


Рис. 1. Газоразрядный счетчик, его устройство и типичная схема его включения.

1 — стеклянный баллон; *2* — металлический цилиндр (катод); *3* — нить (анод).

обычно из двух электродов. Форма электродов, как правило, цилиндрическая. Внутренним электродом в счетчиках служит тонкая нить из вольфрама, железа или другого металла диаметром 0,1—0,5 *мм*. Эта нить натянута вдоль оси внешнего электрода — стеклянного, покрытого с внутренней стороны проводящим слоем, или металлического цилиндра диаметром 1—3 *см* (рис. 1). Роль диэлектрика в этом конденсаторе играет смесь газов, заполняющая под пониженным давлением (порядка 100 *мм рт. ст.*) пространство между электродами.

---

[1] Впервые предложен Гейгером и Резерфордом в 1908 г.

Газовый разряд. Ток насыщения. Чтобы понять действие счетчика как электрического прибора, необходимо ознакомиться с механизмом прохождения тока через газ. Для существования тока в газе необходимо наличие в пространстве между электродами свободных электрических зарядов (ионов и электронов) и электрического поля, поддерживающего ток. Поэтому, если к электродам приложена разность потенциалов, то ток через счетчик будет про-

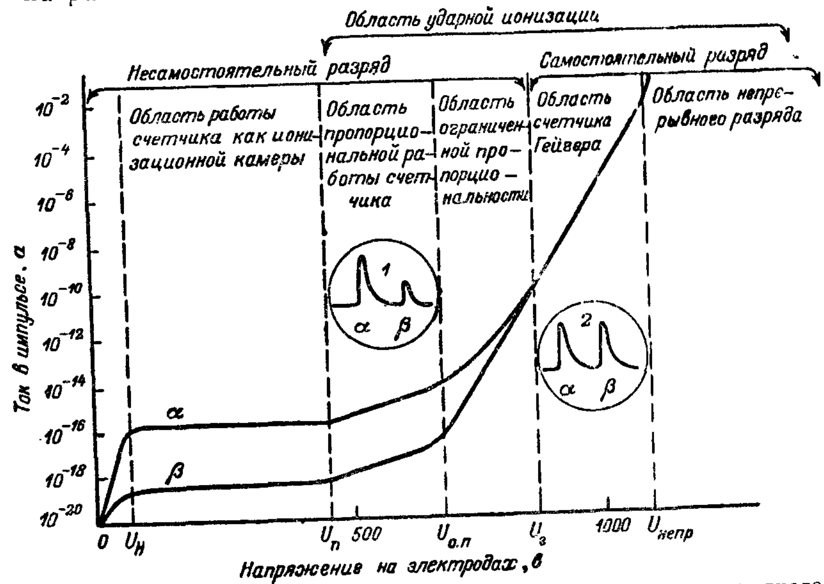


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика типичного газоразрядного счетчика при различных режимах работы.

В кружках показана форма импульсов от α- и β-частиц, получаемых в счетчиках различных типов.

ходить лишь при условии, что под действием попавших в счетчик движущихся частиц или квантов электромагнитного излучения в нем образуются ионы. Величина тока в газе хотя и зависит от приложенного к счетчику напряжения, но не пропорциональна ему, как в металлическом проводнике.

Рассмотрим подробнее показанную на рис. 2 зависимость величины импульса тока от режима работы счетчика, т. е. от приложенной к его электродам разности потенциалов при попадании частицы с определенной кинетической энергией. Наличие нескольких перегибов и участков с различной крутизной у кривой указывает на различный

характер возникновения разрядных импульсов для определенных интервалов напряжения.

Вначале, при малых напряжениях на электродах, с ростом напряжения U растет пропорционально и ток I, но, начиная с некоторого значения напряжения $U_н$, ток достигает насыщения и не изменяется при дальнейшем росте U в значительном интервале напряжения. Объясняется это тем, что при малых напряжениях не все ионы, образовавшиеся под действием излучения, достигают электродов. Часть их сталкивается с ионами противоположного знака и рекомбинирует [1]. При напряжениях $U_н$ и выше электрическое поле настолько велико, что все образующиеся ионы быстро растаскиваются к противоположным электродам. Ионизационный ток в интервале напряжений $U_н$—$U_п$ получил название т о к а н а с ы щ е н и я, так как его величина не зависит от напряжения и определяется только числом образующихся ионов в единицу времени.

Ионизационная камера. Ионизационные приборы, работающие в режиме тока насыщения, называются ионизационными камерами. Следовательно, при напряжениях от $U_н$ до $U_п$ счетчик работает как ионизационная камера. Так как одна ионизующая частица создает очень малый импульс тока ($10^{-18} \div 10^{-14}$ a), то без предварительного усиления он не может быть измерен даже наиболее чувствительными гальванометрами. Поэтому ионизационные камеры, как правило, делают больших размеров и применяют для регистрации (в отличие от счетчика) целого потока ионизующих частиц, создающих в совокупности много ионов.

Ударная ионизация. Коэффициент газового усиления. При дальнейшем увеличении разности потенциалов на электродах выше значения $U_п$ при одной и той же начальной ионизации наблюдается рост тока в импульсе. Это означает, что откуда-то в газе, заполняющем счетчик, появляются дополнительные свободные электрические заряды. Дополнительная ионизация газа происходит следующим образом. Электроны, образованные первоначальным действием радиации на нейтральные атомы газа, сильно ускоряются электрическим полем, так как они обладают малой массой и, следовательно, инерцией. При этом электроны приобретают большую кинетическую энергию, про-

[1] Рекомбинация — процесс, обратный ионизации, заключается в соединении положительного и отрицательного ионов с образованием нейтральной молекулы.

порциональную квадрату скорости, и сами становятся быстрыми частицами, способными производить ионизацию газа при столкновениях с нейтральными молекулами и атомами.

Если электрон (бета-частица) пролетает так близко от электрона внешней оболочки атома, что возникающая между ними сила отталкивания превышает силы, удерживающие электрон в атоме, он вылетает за пределы последнего. Таким образом, ионизация атома происходит не только в результате прямого столкновения.

Такой механизм образования ионов получил название ударной ионизации, а вся область напряжений, при которых она возникает,— области ударной ионизации.

За счет ионизации нейтральных атомов газа образовавшимися первичными ионами можно получить значительное увеличение ионизационных токов. Отношение полного числа ионов, пришедших к нити счетчика, к числу первичных ионов, созданных ионизирующей частицей, получило название коэффициента газового усиления. Величина его зависит от приложенного напряжения и может превосходить 10^7*.

Так как газоразрядные счетчики работают в режимах, соответствующих области ударной ионизации, то за счет газового усиления они значительно превосходят ионизационные камеры по своей чувствительности.

Пропорциональные счетчики. Различают счетчики пропорциональные и счетчики Гейгера — Мюллера. В первых, как показывает само название, возникает импульс тока, пропорциональный первичной ионизации. В этом случае, как видно на рис. 2, кривые α (верхняя) и β (нижняя), полученные для различной первичной ионизации, в области пропорционального счета идут параллельно друг другу. Поэтому по величине импульса, возникшего в пропорциональном счетчике, можно судить о виде частицы или ее энергии (первая осциллограмма на рис. 2). Коэффициент газового усиления пропорционального счетчика невелик (достигает нескольких тысяч).

Механизм возникновения разряда в пропорциональном счетчике можно представить так (рис. 3). При первом столкновении количество первичных отрицательных ионов удваивается, при втором — учетверяется и т. д. В результате целая лавина отрицательных ионов приходит на положительный электрод счетчика, создавая круто нарастающий импульс тока. Последующее развитие тока в импульсе будет определяться движением положительных ионов и параметрами разрядной цепи.

При дальнейшем увеличении напряжения (рис. 2) в интервале $U_{\text{о.п}} - U_{\text{г}}$ пропорциональность между величиной импульса и первичной ионизацией нарушается. Коэффициенты газового усиления для кривых α и β различны

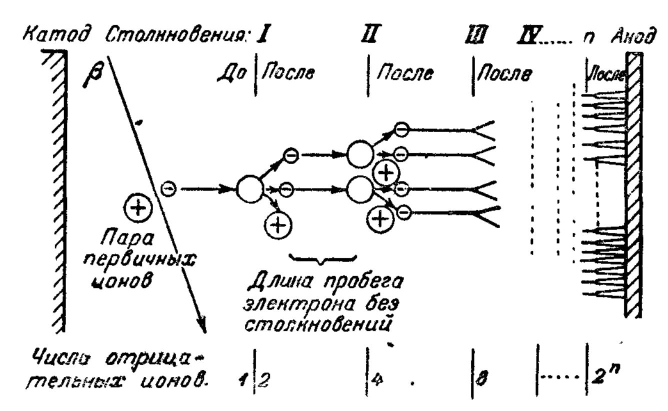


Рис. 3. Схема образования лавины ионов путем ударной ионизации.

Пустыми кружками обозначены нейтральные атомы, кружками с плюсом — положительные ионы и малыми кружками с минусом — отрицательные ионы (электроны). Цифры внизу показывают число отрицательных ионов, появившихся после соответствующего столкновения.

для одного и того же напряжения, и поэтому в области ограниченной пропорциональности эти кривые не идут параллельно. Наконец, в области Гейгера при еще более высоких напряжениях на электродах, превышающих $U_{\text{г}}$, механизм работы счетчиков значительно усложняется. Здесь величина импульса совершенно не зависит от первичной ионизации. Импульсы одинаковой величины возникают и от β-частицы, и от γ-кванта, создающего иногда всего одну пару ионов в рабочем объеме счетчика, и от α-частицы, создающей десятки тысяч пар ионов (вторая осциллограмма на рис. 2).

Непрерывный разряд. К области Гейгера непосредственно примыкает область непрерывного разряда, для возникновения которого специальный ионизатор не нужен. Доста-

* Понятие «коэффициент газового усиления» имеет строгий физический смысл, если в счетчике не возникает самостоятельный разряд.

точно присоединить соответствующее высокое напряжение, превышающее $U_{непр}$, к электродам, как газ между ними «зажигается» и начинает непрерывно пропускать ток. Это явление хорошо знакомо по свечению неоновых и других газосветных трубок, широко применяемых для рекламы. Следует отметить, что как непрерывный разряд, так и разряд в области Гейгера относятся к самостоятельному разряду, который в отличие от несамостоятельного не требует для своего поддержания непрерывного действия внешних ионизаторов.

Непрерывный разряд происходит вследствие двух новых процессов, сопровождающих ударную ионизацию при очень высоких напряжениях:

1. Молекулы, возбужденные соударениями, освобождаются от избыточной энергии, испуская фотоны ультрафиолетового излучения, и переходят в нормальное состояние. Эти фотоны поглощаются практически по всей поверхности катода и благодаря фотоэффекту вырывают из него электроны. Последние, в свою очередь, создают за счет ударной ионизации новые лавины ионов уже во всем междуэлектродном пространстве счетчика.

2. Положительные ионы при таких высоких напряжениях приобретают настолько большую кинетическую энергию, что выбивают из катода свободные электроны.

Счетчик Гейгера. Оба эти процесса происходят и в счетчике Гейгера. Однако в этом случае разность потенциалов на электродах не так велика, чтобы «зажигание» разряда происходило самостоятельно. Подобно тому как для зажигания горелки газовой плиты нужна спичка или искра, так и для «зажигания» счетчика Гейгера нужен внешний ионизатор, создающий первичную ионизацию — хотя бы одну пару ионов. Из них развивается первая лавина, служащая, в свою очередь, началом непрерывного разряда. Последний поддерживается в счетчике Гейгера упомянутыми выше двумя процессами: высвечиванием возбужденных молекул газа (испусканием фотонов) и ударами тяжелых положительных ионов о катод.

Методы гашения непрерывного разряда. Так же как внесение спички в пламя газовой горелки не оказывает на него заметного влияния, так и попадание ионизирующей частицы в «горящий» счетчик не может заметно изменить величину тока и, следовательно, не будет зарегистрировано. Поэтому необходимо автоматически прерывать разряд в счетчике Гейгера и, таким образом, подготовлять счетчик к регистрации новой частицы.

Существуют два основных метода гашения разряда: 1) применение гасящих радиотехнических схем; 2) заполнение счетчиков подобранными смесями газов. В соответствии с этим, в первом случае счетчики называют несамогасящимися, во втором — самогасящимися.

Гасящие схемы. Простейшая схема гашения состоит из очень большого (миллиарды ом) сопротивления, включенного последовательно с анодом счетчика. При прохождении по этому сопротивлению импульса тока на нем падает значительная часть напряжения источника питания, а напряжение на электродах в этот момент уменьшается. Начавшийся непрерывный разряд обрывается, так как счетчик оказывается переведенным в режим области пропорционального счета или даже тока насыщения (сдвиг влево на кривой рис. 2).

В более сложных схемах гашения обычно применяется своего рода отрицательная обратная связь. В ответ на возникший в счетчике импульс тока специальная радиотехническая схема вырабатывает отрицательный импульс напряжения. Этот отрицательный импульс подается на счетчик, снижает разность потенциалов на электродах и, таким образом, вызывает прекращение газового разряда в счетчике.

Роль газового наполнения в самогасящихся счетчиках. В настоящее время почти исключительно используются самогасящиеся счетчики, которые обладают рядом преимуществ (быстрота действия, упрощение схемы включения и др.).

Чтобы уяснить механизм гашения разряда в самогасящихся счетчиках, обратимся к роли наполняющих их газов. Напомним, что цилиндрическая форма электродов создает неравномерное электрическое поле — очень сильное около центральной положительной нити и более слабое — у катода. Кроме того, при движении электронов на анод (нить) наибольшее количество вторичных ионов создается в конце пути, около нити. Поэтому область интенсивной ударной ионизации занимает небольшой объем вокруг нити (радиусом 0,5—2 *мм*).

Чтобы сделать счетчик самогасящимся, нужно, очевидно, ограничить явления, способствующие установлению непрерывного разряда в счетчике. Прежде всего следует избежать вырывания электронов из катода при поглощении

на нем ультрафиолетового излучения, так как это является главной причиной образования непрерывного разряда. Появление самопроизвольных «ложных» импульсов вслед за регистрацией настоящего импульса, вызванного частицей, попавшей в счетчик, следует связывать с выбиванием электронов из катода положительными ионами и с высвечиванием так называемых метастабильных атомов[1]. Оказалось, что для этого к обычному наполнителю—одноатомному газу, например аргону, следует добавить до 10% газа или паров многоатомных молекул некоторых веществ (этиловый спирт, метан, пентан, трехфтористый бор, хлор и др.). Возможно подобрать такое сочетание газов в смеси, что образующиеся фотоны будут полностью поглощаться многоатомными молекулами на расстоянии в 1—2 *мм* от места их возникновения и не смогут поэтому все долететь до катода и вызвать заметный фотоэффект. При этом многоатомные молекулы либо ионизируются, либо диссоциируют на радикалы — распадаются на нейтральные части.

Для примера на схематическом рис. 4 представлены основные физические процессы в аргоно-спиртовой гасящей смеси.

Пусть в начальный момент три возникших при ионизации электрона *A, B* и *C* находятся на одной эквипотенциальной поверхности. Предположим, что до первого столкновения электрон *A* успевает набрать энергию 16 *эв*, электрон *B*—11,3 *эв*, а *C*—только 8 *эв*. Напомним, что энергия ионизации атома аргона равна 15,7 *эв*, а спирта — 11,3 *эв*. Тогда после первого столкновения электрон *A* вызовет ионизацию аргона, электрон *B*—спирта, а ион *C* сможет только возбудить атом аргона. Испускаемые возбужденными атомами аргона Ar фотоны имеют различные энергии, в частности, много фотонов с энергией 11,5 *эв*. Таким образом, фотоны с возбужденных атомов аргона будут вызывать либо ионизацию молекул спирта — при энергиях фотонов от 11,3 до 15,7 *эв* (*D* на рис. 4), либо их диссоциацию — при меньших энергиях фотонов (*E* на рис. 4), так как для возбуждения многоатомных молекул спирта вероятность диссоциировать в миллион раз больше, чем вероятность высвечивания. В результате диссоциации спирта в смеси газов, наполняющих счетчик, возникают радикалы: CH_2OH, HCO, C_2H_4, OH и др.

[1] Атомы, задерживающиеся в возбужденном состоянии до тех пор, пока не получат небольшой добавочной энергии (например, за счет теплового движения молекул), называются метастабильными.

С другой стороны, многоатомные молекулы обладают слабо связанными электронами и легко отдают их положительным ионам аргона при столкновениях (*F* на рис. 4). Поэтому к катоду подходят лишь тяжелые, с малой кинетической энергией, положительные ионы многоатомных органических молекул, которые там спокойно нейтрализуются.

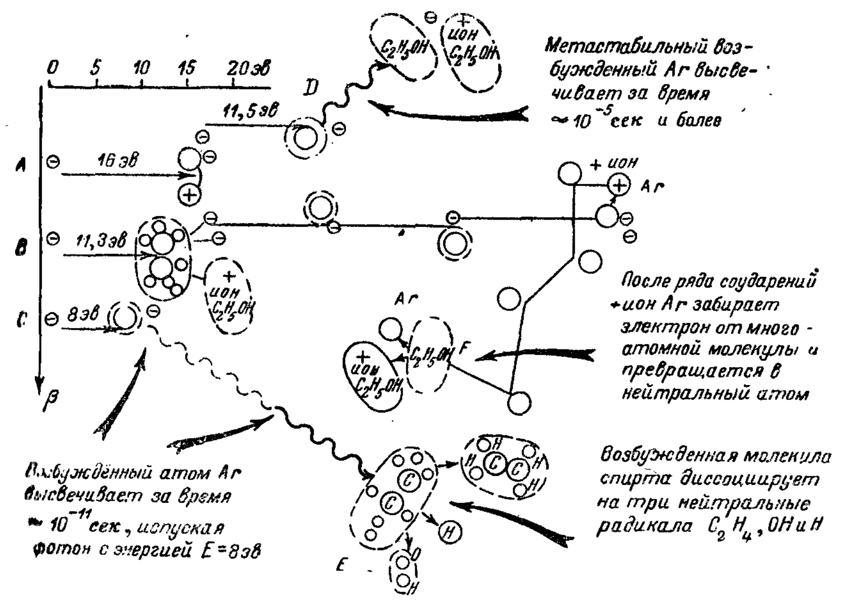


Рис. 4. Физические процессы в многоатомных гасящих смесях.

Возбуждение атома показано штриховым, а метастабильное состояние — штрихпунктирными кружками. Остальные обозначения те же, что на рис. 3. *A* и *B* — случаи ионизации атомов; *C* — возбуждение атома; *D* — возбуждение метастабильного состояния; *E* — поглощение фотона многоатомной молекулой; *F* — захват положительным ионом аргона электрона у нейтральной многоатомной молекулы.

Вследствие расхода многоатомных газов на диссоциацию срок службы самогасящихся счетчиков ограничен и составляет несколько сот миллионов импульсов.

Форма импульса. Физические процессы в газовом разряде и параметры разрядной цепи определяют форму импульса, возникающего в счетчике.

Пусть в начальное мгновение быстрая частица создала первичную ионизацию. За последующее время, длительностью около 10^{-8}—10^{-7} *сек*, за счет ударной ионизации и поглощения фотонов ультрафиолетового излучения образовалось огромное число ионов около нити самогасящегося

счетчика. Положительные ионы за это короткое время не успели сдвинуться со своих мест и экранируют нить облаком из положительных зарядов. Тем самым объемный заряд положительных ионов связывает электроны, образовавшиеся около нити, и не позволяет им пойти по разрядной цепи через нагрузочное сопротивление и источник высокого напряжения к катоду счетчика.

В то же время облако из положительных ионов как бы утолщает нить, что ослабляет напряженность поля между электродами счетчика и тем самым препятствует возникновению новых ионов.

Так как импульс снимается с нагрузочного сопротивления, то в этот момент, пока еще тока нет, импульс практически не начался. По мере отхода положительных ионов от нити начинает заряжаться емкость анод — катод, и на выходе устройства мы наблюдаем начало роста импульса. Максимума он достигает в момент, когда облако положительных ионов приходит к катоду, т. е. приблизительно через 10^{-5} *сек*. На этом фактически заканчивается пассивная стадия газового разряда в счетчике.

После достижения максимума начинается спад тока (напряжения) в импульсе по экспоненциальной кривой. Длительность спада зависит исключительно от параметров разрядной цепи. В это время электрические заряды в промежутке между электродами не движутся, но происходит разряд конденсатора: нить — цилиндр, емкость которого обозначаем C, через сопротивление нагрузки R. Постоянная времени τ такой цепи, т. е. время, за которое ток в импульсе спадает от максимального значения до 0,37 этой величины, определяется по формуле

$$\tau = RC.$$

При этом за счет низкого потенциала на нити и влияния работы молекул многоатомных газов (поглощение фотонов и предотвращение выбивания электронов из катода) удается избегнуть возникновения новых лавин. Таким образом, импульс имеет одноступенчатый характер.

В несамогасящихся счетчиках удлиняются как активная, так и пассивная стадия разряда, а сам разряд (импульс) может принять многоступенчатый характер.

В самом деле, фотоны, идущие от высвечивающих возбужденных одноатомных молекул аргона, теперь будут поглощаться на катоде. Поэтому на нить придет не одна лавина, а серия лавин, созданных электронами, вырванными путем фотоэффекта из катода в различные моменты времени. Кроме того, так как нет многоатомных газов, имеющих более низкий потенциал ионизации, «эффективная мощность» каждой лавины будет несколько меньше, и поэтому полное количество ионов, необходимое для прекращения разряда, создается только после прихода многих лавин. Наконец, уже при разряде конденсатора через сопротивление нагрузки легко возникают «ложные» импульсы за счет процессов на катоде и за счет высвечивания метастабильных атомов. Это вынуждает ставить очень большое нагрузочное сопротивление (10^9 *ом*), что увеличивает длительность импульса до 10^{-3}—10^{-2} *сек*.

Образование импульса в области ограниченной пропорциональности и в области пропорционального счета определяется теми же явлениями. Однако роль таких процессов на катоде, как фотоэффект и выбивание электронов положительными ионами, незначительна вследствие малой вероятности этих процессов (например, вероятность фотоэффекта: 1 *э* на 10 000 фотонов). Таким образом, в области пропорционального счета лавины, возникающие после первой, практически носят убывающий по величине характер. При этом разряд не распространяется на весь объем счетчика, а ограничивается лишь тем участком, где произошла первичная ионизация. Применение в пропорциональных счетчиках гасящих смесей создает хорошие условия для поглощения фотонов, увеличивает коэффициент газового усиления и оказывает общее стабилизирующее действие на его работу.

ПАРАМЕТРЫ И ТИПЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКОВ

Классификация счетчиков. Систематизировать большое количество разнообразных типов счетчиков можно по различным признакам. По механизму действия различают счетчики с несамостоятельным и самостоятельным разрядом. К первым относятся пропорциональные счетчики, а ко вторым — счетчики Гейгера (острийные) и Гейгера — Мюллера (нитевые). Счетчики с самостоятельным разрядом бывают, в свою очередь, самогасящиеся и несамогасящиеся.

Практически наиболее важно систематизировать счетчики по их назначению и по конструктивным признакам, причем особенности конструкции часто обусловливаются назначением счетчика. На наш взгляд, следует различать счетчики α-частиц, β-частиц, γ-квантов, рентгеновых лучей,

нейтронов и счетчики специального назначения, объединяющие большую группу счетчиков, имеющих менее массовое применение, чем названные выше. Назначение счетчика предъявляет определенные требования к выбору режима работы счетчика и материалов, из которых он изготавливается. Если, например, нужно определять энергию части-

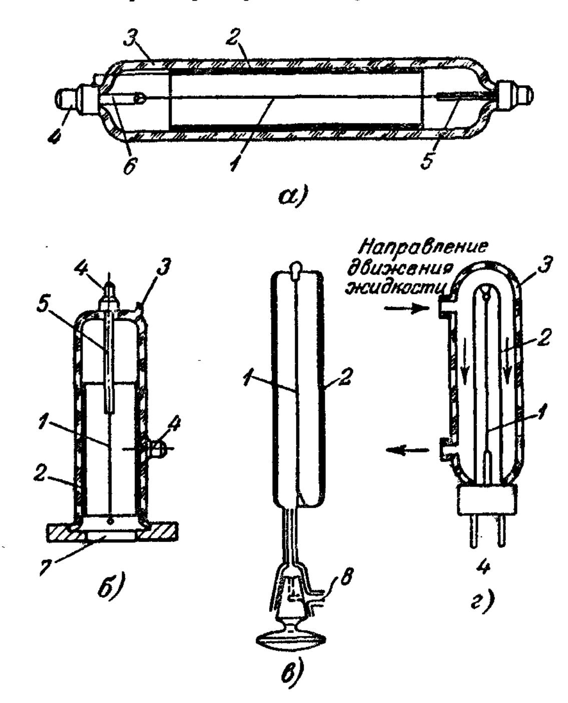


Рис. 5. Основные конструкции счетчиков.

а — цилиндрический; *б* — торцовый; *в* — газонаполняемый. *г* — проточный; *1* — анод; *2* — катод (металлическое покрытие); *3* — стеклянный корпус; *4* — контакт; *5* — стеклянная трубка; *6* — изолятор; *7* — слюдяное окошко; *8* — краи для впуска газа.

цы, а не только регистрировать ее наличие, то применяют пропорциональные счетчики. Для счета γ-квантов счетчики делают с катодом из тяжелых элементов, а для счета β-частиц, наоборот, предпочитают изготовлять катоды из легких металлов, чтобы уменьшить фотоэффект.

Различают две основные конструкции счетчиков: цилиндрические, уже описанные выше, и торцовые или колоколообразные (рис. 5, *а* и *б*). У последних один из торцов

цилиндра закрывается очень тонким слюдяным окошком, чтобы дать возможность проникнуть в счетчик мягким β-частицам, а также α-частицам. Для пропускания α-частиц толщина окошка должна иметь всего несколько микронов или 1—1,5 *мг/см*^{2} (толщину тонких пленок принято выражать весом 1 *см*^{2}). На нижнем конце нити торцового счетчика помещается стеклянная бусинка. Ее роль — ограничить нить и как бы закруглить острие. Тем самым устраняется неравномерно сильное электрическое поле около острия (конца нити) и создаются условия работы такие же, как у обычного нитевого счетчика типа Гейгера — Мюллера.

Электроды другой формы, например плоские, встречаются значительно реже и главным образом у пропорциональных счетчиков. Можно отметить конструкции счетчиков, специально приспособленные для наполнения их радиоактивными газами (рис. 5,*в*) и для непрерывного протекания через них радиоактивных жидкостей (рис. 5,*г*).

Наконец, следует особо выделить счетчики с 4π-геометрией. Основной особенностью 4π-счетчиков является такая конструкция, при которой радиоактивный препарат оказывается со всех сторон окруженным рабочим объемом счетчика. Как известно, полный телесный (пространственный) угол вокруг точки равен 4π стерадианов. Отсюда и название счетчика. Для таких счетчиков характерно почти полное отсутствие введения тех или иных поправочных коэффициентов в расчеты при измерениях.

Параметры счетчиков. Параметры газоразрядных счетчиков определяются не только конструкцией, материалом, из которого изготовлены электроды, составом и давлением наполняющих счетчик газов, но и технологией изготовления: для получения стабильных результатов требуются высокая чистота и культура производства.

Основными характеристиками счетчика как прибора для измерений являются: максимальная скорость счета или разрешающая способность, эффективность, счетная характеристика.

Разрешающая способность. «Мертвое» время. Максимальная скорость счета, т. е. наибольшее количество импульсов, которые могут возникнуть в счетчике за 1 *сек*, очевидно, зависит от длительности так называемого мертвого времени, в течение которого счетчик не способен отметить импульсом на вновь влетевшую частицу.

Обозначая разрешающую способность счетчика через

$N_{макс}$ [*имп/сек*], можем ее связь с мертвым временем [*сек*] выразить формулой

$$N_{макс} = \frac{1}{t_м}.$$

Для определения полного числа частиц, попавших в счетчик, нужно внести поправки на просчет, т. е. на те незарегистрированные частицы, которые попали внутрь счетчика в течение мертвого времени.

Можно показать, что истинное число частиц N, попавших в счетчик за 1 *сек* при излучении постоянной интенсивности, можно вычислить по формуле

$$N = \frac{N_{изм}}{1 - N_{изм} t_м} \qquad (N_{изм} t_м < 1),$$

где $N_{изм}$ — число частиц, зарегистрированных счетчиком.

Следует учитывать, что разрешающую способность счетной установки определяет не только сам счетчик, но и все ее элементы. В простейших установках разрешающая способность определяется оконечным электромеханическим

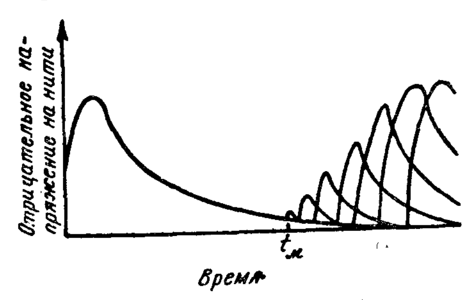


Рис. 6. Определение мертвого времени счетчика по осциллограмме.

счетчиком, лучшие типы которых способны отсчитывать до 100 *имп/сек* ($t_м = 10^{-2}$ *сек*). Поэтому в более совершенных установках между газовым и электромеханическими счетчиками включаются специальные электронные, практически безынерционные, пересчетные схемы, позволяющие подавать на электромеханический счетчик только каждый 4-й, 10-й, 64-й или импульс какой-либо другой кратности, в зависимости от установленного коэффициента пересчета. В таких установках разрешающая способность в конечном итоге определяется разрешающей способностью детектора излучений (счетчика).

Очень наглядно измерение мертвого времени с помощью осциллографа, имеющего ждущую развертку. Для этого на экране осциллографа наблюдают импульсы, возникающие в счетчике от препарата с довольно большой активностью. На составленном по такой осциллограмме рис. 6 четко видно, что после основного импульса, запускающего ждущую развертку, новые импульсы, сначала очень малые по величине, возникают только по прошествии мертвого времени $t_м$, а достигают своей нормальной величины еще позже, примерно за $2t_м$. Измерение мертвого времени по этому методу сводится к отсчету длины $t_м$ по отметкам времени на экране осциллографа.

Эффективность счетчика. Эффективность характеризует способность счетчика реагировать на то или иное излучение. Численно она равна отношению числа частиц, вызвавших импульсы, к общему числу частиц, попавших в счетчик за единицу времени.

Обычно эффективность выражают в процентах. Так, алюминиевый счетчик АС-2 должен теоретически регистрировать все попавшие в него α- и β-частицы, однако следует при этом учитывать поглощение β-частиц и тем более α-частиц в самой стенке счетчика. Поэтому, например, β-частицы с максимальной энергией, меньшей 0,2 *Мэв*, поглощаясь в стенке счетчика, не могут быть зарегистрированы алюминиевыми счетчиками. Для регистрации таких «мягких» β-частиц и α-частиц в счетчике нужно сделать слюдяное окошко. Эффективность счетчиков для γ-излучения (порядка 1%) определяется не только толщиной стенки, но и материалом катода.

Счетная характеристика. Плато̀ счетчика. Знание счетной характеристики позволяет поставить счетчик в нормальный режим работы. Обычно счетная характеристика представляет собой график зависимости числа импульсов в единицу времени от напряжения на электродах, полученный экспериментально при счете одного и того же препарата в стандартных, не изменяющихся в ходе опыта условиях.

Из рис. 7, на котором изображена типичная счетная характеристика, видно, что при напряжениях, меньших напряжения начала счета $U_{н.с}$, счетчик не считает. Затем с увеличением напряжения до $U_{н.п}$ (начало плато́) число регистри-

руемых в минуту импульсов быстро возрастает при увели-
чении напряжения, а затем остается приблизительно по-
стоянным до значения напряжения $U_{к.п}$ (конец плато́). Этот
горизонтальный участок $U_{н.п} — U_{к.п}$ получил название плато́
и является рабочим участком характеристики. Здесь числ
отсчетов не зависит от приложенного напряжения и опре

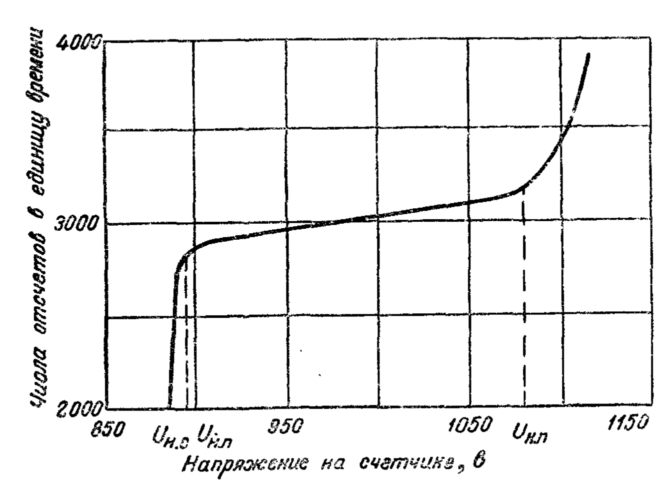


Рис. 7. Счетная характеристика газоразрядного счетчика.

деляется только препаратом и выбором стандартных усл
вий измерений. Увеличение числа отсчетов при дальнейше
увеличении напряжения соответствует постепенному пер
ходу к непрерывному разряду и происходит за счет увел
чения числа ложных импульсов.

Практически плато́ не вполне горизонтально, а всег
имеет некоторый наклон, который принято выражать к
относительное увеличение числа отсчетов в процента
рассчитанное на 1 *в* увеличения напряжения на электр
дах[1]. Например, по данным рис. 7 напряжению 950
соответствует отсчет 2950, а напряжению 1050 *в*—отсч
3075, т. е. прирост счета в процентах на 1 *в* по отнош

[1] Раньше было принято для характеристики наклона плато́ поль
ваться стократной этой величиной, т. е. относительным увеличени
числа отсчетов, рассчитанных на 100 *в* увеличения напряжения.

нию к средней скорости счета составит $\frac{3075 - 2950}{3013}\cdot\frac{100\%}{100\ в} = 0{,}0415\%$ на 1 *в*. Счетчики с наклоном плато́ выше 0,15% на 1 *в* считаются совершенно непригодными для работы.

Рабочее напряжение следует выбирать в первой трети плато́. Время от времени нужно заново снимать рабочую характеристику счетчика, находящегося в работе, так как с течением времени характеристика счетчика изменяется.

Измерения со счетчиками. Существует обширная литература, посвященная методам радиометрических измерений с помощью счетчиков. Мы ограничимся поэтому только указанием некоторых положений, позволяющих избежать грубых ошибок при измерениях с помощью счетчиков.

Существуют два основных метода измерений: относительный и абсолютный. Сущность относительного метода состоит в сравнении количества импульсов в минуту N_x, зарегистрированных прибором от препарата с неизвестной активностью A_x, с количеством импульсов $N_{эт}$, зарегистрированных за 1 *мин* от эталонного препарата с известной активностью $A_{эт}$. Исходя из приближенной[1] пропорциональности скорости счета и активности при прочих неизменяющихся условиях, получаем расчетную формулу для определения активности препарата:

$$A_x = \frac{A_{эт}}{N_{эт}} N_x. \qquad (1)$$

Для измерений по этому методу необходимо иметь набор эталонов и подбирать эталон, имеющий активность, близкую к активности препарата (в этом случае исключается необходимость поправки на разрешающую способность). Эталоны рекомендуется изготовлять из того же радиоактивного вещества, которое содержится в измеряемом препарате. Это необходимо, чтобы не вносить поправок на различие спектров β-частиц, испускаемых радиоактивным веществом препарата и радиоактивным веществом эталона.

Сущность абсолютного метода измерения активности сводится к определению полного числа распадов, происходящих в препарате, путем умножения измеренной ско-

[1] При этом не учитывается поправка на разрешающую способность установки.

рости счета $N_{изм}$ (число импульсов в минуту) на ряд поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты должны учитывать соотношение между формой и размерами препарата и счетчика и расстояние между ними (геометрический фактор ω), поглощение излучений во всех средах, отделяющих препарат от рабочего объема счетчика $K_п$, поправку на разрешающую способность $K_м$ (на просчеты, вызванные нечувствительностью счетчика в течение мертвого времени), самопоглощение в толще препарата $K_с$, отражение излучений от подложки, на которой расположен препарат $K_о$, поправку на схему распада радиоактивного изотопа, препараты которого подлежат измерениям, и другие поправки, реже принимаемые во внимание. В этом случае расчет активности препарата производится по формуле

$$A = \frac{1}{\omega K_п K_с K_о K_р} \cdot \frac{N_{изм}}{K_м} = \frac{1}{\omega K_п K_с K_о K_р} N, \qquad (2)$$

где N — число импульсов, вычисленное с учетом мертвого времени.

Нетрудно заметить, что в таком написании обе расчетные формулы (1) и (2) могут быть приведены к одной очень простой формуле:

$$A = C_i N,$$

если первый множитель в обеих формулах понимать как цену одного импульса C_i. Таким образом, активность равна цене импульса (в распадах в минуту), умноженной на скорость счета. Разница только в том, что в случае абсолютного метода цена импульса определяется расчетным путем, причем отдельные поправочные коэффициенты определяются как экспериментально, так и путем расчетов из теоретических соображений, а в случае относительного метода цена импульса определяется опытным путем из измерения скорости счета от эталона. Введение цены импульса очень упрощает и убыстряет все расчеты при практической работе, так как однажды определенная цена импульса годится для большой серии препаратов при работе с данным изотопом и при сохраняющихся неизменными условиях работы. Необходимо только время от времени проверять, не изменилась ли цена импульса.

Независимо от того, каким методом производятся измерения, всегда следует соблюдать определенные практические правила: установить и поддерживать нормальный постоянный режим работы счетчика во время измерений, учитывать (вычитать) фон, т. е. среднее число импульсов в минуту, которое регистрирует счетная установка в отсутствии всяких препаратов. Этот счет является следствием действия космических лучей, распыленной в природе радиоактивности и т. п. Необходимо также строго соблюдать стандартную геометрию, т. е. следить, чтобы геометрические размеры препарата и эталона были строго одинаковы, чтобы препараты и эталоны помещались точно в одном и том же месте, на одинаковом расстоянии от счетчика.

Для избежания просчетов счетчика, чтобы не вводить поправки на мертвое время, препараты нужно изготавливать не слишком активными, порядка 2—5 тыс. *имп/мин*. В то же время слишком слабые препараты потребуют много времени для счета, чтобы устранить влияние флуктуаций, вызванных хаотическим характером явления радиоактивного распада.

Если радиоактивное вещество имеет короткий период полураспада, то вводят соответствующую поправку на спад активности с течением времени. Поэтому никогда не следует забывать индивидуальных особенностей самого радиоактивного изотопа.

Наконец, необходимо учесть еще следующее. Счетчики, вообще говоря, считают световые кванты. Поэтому в ясные дни фон вдруг резко возрастает даже в счетчиках, находящихся в защитных свинцовых домиках, но не обеспечивающих хорошей светоизоляции. В этом случае хорошо помогает черная фотобумага или кусок непрозрачной ткани.

При абсолютном счете по γ-излучению следует учитывать эффективность счетчика к данному излучению, а при относительном счете препаратов более толстых, чем эталон, следует вводить поправку на самопоглощение.

Счетчики отечественного производства. Наша электровакуумная промышленность изготовляет все основные типы газоразрядных счетчиков. Выпускается большое количество типов счетчиков для измерения γ-излучения, мягких и жестких β-частиц, пропорциональные счетчики для α-частиц, счетчики нейтронов и др. Осваиваются счетчики, выполненные из проводящего стекла. Выпускаются как высоковольтные, так и низковольтные галогеновые счетчики.

Рабочее напряжение счетчиков зависит, в частности, от состава газовых смесей, которыми их наполняют. Ниже рассматриваются вопросы газового заполнения счетчиков, особенности счетчиков для квантов, счетчиков для заряженных и нейтральных частиц, а также особенности так называемых стеклянных и 4π-счетчиков, приобретающих в настоящее время большую популярность.

Газовое наполнение счетчиков. Галогеновые счетчики. Практически промышленность выпускает счетчики, наполненные только самогасящимися смесями. Счетчики серий МС, ГС, ВС и другие высоковольтные счетчики заполняются смесью аргона или неона с теми или иными примесями многоатомных газов. Раньше для этой цели применялись спирт и метилаль, в настоящее время наилучшей добавкой считается изопентан. Рабочее напряжение у различных типов высоковольтных счетчиков обычно 700—1 600 *в*.

Недостатки высоковольтных счетчиков следующие: высокое рабочее напряжение, ограниченный срок службы вследствие расхода многоатомных молекул, малая максимальная скорость счета. В этом отношении счетчики с галогеновым заполнением выгодно отличаются от высоковольтных—они не боятся перегрузки, имеют высокую скорость счета (до 10^5 *имп/мин*), низкое рабочее напряжение (порядка 360—400 *в*) и практически неограниченный срок службы. Недостатками являются значительный наклон плато́ (около 0,125% на 1 *в*) и большое время развития разряда (порядка 10^{-5} *сек*, в то время как у высоковольтных оно порядка 10^{-7}—10^{-6} *сек*). Последнее обстоятельство ограничивает применение низковольтных счетчиков в схемах совпадений и антисовпадений.

Галогеновые счетчики заполняются обычно неоном с небольшой добавкой аргона и одного из галогенов—хлором или бромом (до 5%). Неорганические двухатомные газы Cl_2 и Br_2 обладают низким потенциалом ионизации (12,8 и 13,2 *в*) по сравнению с Ar (15,7 *в*) и Ne (21,5 *в*) и слабо поглощают фотоны. Хорошее гасящее действие галогенов, вероятно, следует объяснять тем, что молекулы Cl_2 при соударениях с возбужденными атомами Ne забирают от них энергию и сами ионизируются. Таким образом, в газовой смеси во время прохождения первой лавины все метастабильные состояния атомов Ne ликвидируются и уничтожается причина, вызывающая возникновение ложных импульсов.

Низкое напряжение на электродах приводит к уменьшению вероятности выбивания электронов из катода при подходе к нему положительных ионов. Таким образом, вторая причина возникновения многолавинного разряда также ликвидируется. Вместе с тем низкое напряжение способствует также более медленному и спокойному развитию активной стадии разряда.

Высокая химическая активность галогенов создает некоторые трудности в подборе материалов для изготовления электродов и в технологии производства, но все это окупается большими, указанными выше преимуществами.

Счетчики квантов. Фотоны электромагнитных излучений, длина волны которых сильно отличается от размеров атомов газа, плохо поглощаются этим газом. Поэтому объяснение счета квантов газоразрядными счетчиками надо искать главным образом в процессах взаимодействия излучения с веществом катода. Как известно, такое взаимодействие зависит как от атомного состава поглощающего вещества, так и от вида излучения (энергии квантов или длины волны).

Известны три основных процесса, проявляющихся при взаимодействии частиц света (фотонов) с веществом: фотоэффект, комптон-эффект и рождение пар.

Фотоэффект заключается в поглощении кванта излучения веществом, сопровождающемся вылетом электрона. Фотоэффект характерен для фотонов с малой энергией, т. е. фотонов света, ультрафиолетовых лучей, мягких рентгеновых и γ-лучей.

Комптон-эффект заключается в рассеянии фотонов при прохождении через вещество и вырывании электрона одной из оболочек атома. Рассеянный фотон и электрон разлетаются под разными углами, так же как при столкновении два биллиардных шара. Так как часть энергии потеряна фотоном на вырывание электрона, новый фотон имеет меньшую энергию, т. е. бо́льшую длину волны.

Наконец, третий процесс — рождение пар — начинает играть заметную роль только для жестких γ-лучей (с энергией более 2 *Мэв*) и заключается в переходе материи из состояния излучения в состояние вещества. Это процесс, когда фотон исчезает и вместо него возникают две частицы: электрон и позитрон. Рождение пары может происходить только при прохождении фотона вблизи тяжелого ядра.

Поскольку γ-счетчики регистрируют обычно фотоэлек-

троны, вырванные из катода счетчика γ-квантами, то эффективность этих счетчиков зависит от процессов, связанных с поглощением γ-квантов в веществе. На рис. 8 представлены кривые зависимости эффективности γ-счетчика от энергии квантов для нескольких типичных катодов.

Исходя из рассмотренных выше процессов взаимодействия излучения с веществом, легко понять особенности конструкции счетчиков для мягких лучей, которые вызывают фотоэффект. В конструкции счетчиков предусматривается впуск излучения внутрь счетчика и, если необходимо, освещение (облучение) им внутренней поверхности катода. Поэтому, например, счетчик для рентгеновых лучей типа МСТР-4 имеет тонкое слюдяное окно в торце счетчика, а счетчик СФК-1, предназначенный для пожарной сигнализации при появлении открытого пламени, имеет кварцевые окна на боковой поверхности, чтобы пропустить ультрафиолетовые лучи.

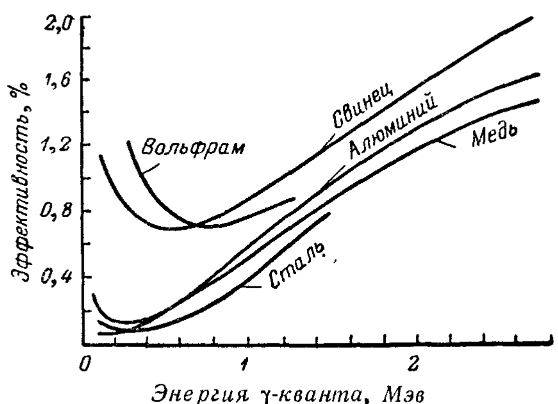


Рис. 8. Зависимость эффективности гамма-счетчиков с катодами из различных материалов от энергии квантов.

При конструировании счетчиков для γ-лучей, которые вызывают комптоновское рассеивание, нужно учитывать, что только часть выбитых из катода электронов, а именно те, которые влетают внутрь счетчика и попадают в пространство между электродами, будет создавать импульсы. Поэтому эффективность γ-счетчиков низка. Так как γ-кванты рассеиваются и поглощаются во всей толще катода, то существует оптимальная толщина катода, при которой получается наибольший выход электронов в междуэлектродное пространство для γ-лучей определенной энергии. Эта толщина равна максимальному пути, который могут пройти электроны данной энергии в материале катода.

На рис. 8 зависимость эффективности γ-счетчиков от энергии γ-квантов дана для катодов оптимальной толщины, изготовленных из наиболее употребительных материалов. Для мягких γ-лучей наиболее выгодным является вольфрамовый катод, для жестких лучей материал катода меньше сказывается на эффективности счетчика. Существует несколько серий γ-счетчиков, выпускаемых нашей промышленностью: серии МС, ГС и ВС—высоковольтные счетчики с медным, графитовым и вольфрамовым катодом, и серии СТС и СГС—галогеновые счетчики с катодом из стали и из проводящего стекла, соответственно.

Счетчики частиц. Тяжелые заряженные частицы быстро расходуют свою энергию на ионизацию окружающей среды. Поэтому пробег этих частиц в среде небольшой. Для α-частиц в воздухе при нормальных условиях он равен всего нескольким сантиметрам. В связи с этим конструкции счетчиков для тяжелых частиц (и мягких β-частиц) имеют окна, закрытые очень тонкими пластинками для впуска частиц внутрь счетчика. Все счетчики, выпускаемые нашей промышленностью для этих частиц, имеют колоколообразную конструкцию.

Для α-частиц и других тяжелых частиц, как правило, применяют пропорциональные счетчики. Импульс от α-частицы во много раз превосходит по величине импульс от β-частицы. Импульсы от α-частиц легко выделить из фона мелких импульсов от β-частиц, применяя ограничитель, позволяющий регистрировать только те импульсы, которые превосходят определенную величину. Среди счетчиков α-частиц серии САТ наиболее перспективными являются счетчики САТ-7 и САТ-8, обладающие низким рабочим напряжением и большим импульсом. Это достигается применением в них так называемого коронного режима работы. При таком режиме в счетчике непрерывно происходит слабый коронный разряд[1] (ток порядка 1 *мка*), на фоне которого при влете частицы возникают более сильные импульсы тока, пропорциональные ионизации, созданной частицей. Переменная составляющая тока короны создает на нагрузочном сопротивлении импульсы напряжения с амплитудой 35—50 *мв*, которая определяет порог чувствитель-

[1] Вид электрического разряда в газе, при котором ионизация и свечение газа происходит вблизи электродов.

ности усилительной аппаратуры и наименьшую энергию регистрируемых частиц.

Для регистрации мягких β-частиц (энергии 0,1—0,5 *Мэв*) применяют торцовые счетчики, работающие в гейгеровской области. Наибольшее распространение в настоящее время имеет счетчик типа МСТ-17 (старая марка ТМ-20), однако ему на смену приходит более перспективный тип СБТ-7 (низковольтный галогеновый счетчик), окно которого тоньше (3 *мг/см²*), чем у большей части МСТ-17, имеющих толщину слюды около 4,5 *мг/см²*.

Для еще более мягких β-частиц и для регистрации радиоактивности газов и паров (например, для регистрации изотопа водорода H^3, имеющего энергию β-частицы всего около 18 *кэв*) применяются счетчики, внутрь которых исследуемые β-активные изотопы вводятся в виде паров и газов в качестве примеси к основному газу. Таковы стеклянные счетчики СБС-2, СБС-3 и металлические—СБМ-7 и СБМ-8. Рекомендуется при каждом новом наполнении счетчика промыть его нерадиоактивной газовой смесью и прогреть при температуре около 300° С под откачкой.

Для регистрации жестких β-частиц (с максимальной энергией более 0,5 *Мэв*) применяют цилиндрические тонкостенные стальные низковольтные галогеновые счетчики типов СТС-5 и СТС-6, а также алюминиевые высоковольтные счетчики АС-1 и АС-2. Алюминиевые счетчики имеют несколько более тонкие стенки (35 *мг/см²*), чем стальные (40—60 *мг/см²*), но, к сожалению, они очень недолговечны вследствие расхода многоатомных молекул гасящей смеси газов. Стеклянный счетчик типа СБС-1 служит для измерения β-активности жидкостей путем непосредственного погружения в нее.

Нейтральные частицы непосредственно не производят ионизацию среды. Поэтому для регистрации нейтронов используют либо ядерные реакции, в результате которых появляется заряженная частица, либо рассеивание нейтронов в водородосодержащих средах с выбиванием положительного ядра водорода.

Первый метод может применяться только при регистрации медленных, а второй—быстрых нейтронов. Второй метод имеет очень низкую эффективность (сотые доли процента). Поэтому для регистрации быстрых нейтронов часто пользуются счетчиками медленных нейтронов (имеющими эффективность около 5—10%), замедляя быстрые нейтроны парафином или водой. Чтобы отфильтровать для регистрации только быстрые нейтроны, весь поток нейтронов предварительно проходит через тонкий слой кадмия, сильно поглощающего медленные нейтроны, а затем замедляется и регистрируется счетчиками медленных нейтронов.

Наша промышленность выпускает большую серию счетчиков медленных нейтронов СНМ. Обычно используется ядерная реакция, в которой в результате воздействия нейтрона на изотоп бора B^{10} образуются литий Li^7 и гелий He^4 (α-частица), которые разлетаются в разные стороны, ионизируя окружающую среду, и создают до 80 000 пар ионов. Такой процесс хорошо регистрируется пропорциональным счетчиком.

Бор может вводиться в счетчик как в виде газа (трехфтористый бор BF_3), так и в виде слоя, нанесенного на катод. Из выпускаемых счетчиков серии СНМ только СНМ-9 имеет катод, покрытый слоем аморфного бора. Остальные счетчики серии наполнены трехфтористым бором. Счетчик типа СНМ-8 выгодно отличается от остальных тем, что наполняющий его трехфтористый бор обогащен до 80% изотопом бора B^{10}, что вчетверо увеличивает его чувствительность.

Стеклянные счетчики. В последнее время появились так называемые стеклянные счетчики, выполненные из проводящего стекла. Они могут быть как высоковольтными, так и низковольтными (с галогеновым наполнением). Кроме простоты конструкции и дешевизны, достоинством счетчика этого типа является прозрачный катод. Световые кванты на прозрачный катод не оказывают никакого действия (фотоэффект отсутствует), чем, по всей вероятности, обусловливается более широкое плато́ у стеклянных счетчиков по сравнению с обычными. С такими счетчиками можно работать на открытом дневном свету.

Один из методов получения проводящего стекла—покрытие его слоем прозрачного неметаллического проводника. Стекло—удобный материал, так как позволяет приготовлять очень тонкие стенки счетчика, что важно при регистрации β-частиц, а также не боится кислот и хорошо дезактивируется, что важно для жидкостных погружных счетчиков. Надо полагать, что стеклянные счетчики получат в ближайшее время широкое распространение.

4π-счетчики. Счетчики, у которых исследуемый препарат располагается в центре рабочего объема так, что практически все вылетающие частицы попадают в рабочий объем, называются счетчиками с 4π-геометрией.

Интерес к этим счетчикам возник в связи с необходимостью стандартизировать измерения. Абсолютные измерения с помощью торцовых счетчиков требуют введения большого количества поправок, определения которых затруднительны и поэтому недостаточно достоверны. Необходимо предварительно градуировать установку с торцовыми счетчиками по радиоактивным образцам, абсолютная активность которых определена с наименьшими погрешностями. Для данного радиоактивного вещества устанавливается свой поправочный коэффициент

$$K = \frac{N_{4\pi}}{N_{\text{торц}}},$$

где $N_{4\pi}$ и $N_{\text{торц}}$ — скорость счета эталонного препарата при абсолютных измерениях и при счете на торцовом счетчике соответственно.

Абсолютные измерения легче всего провести на 4π-счетчике, который практически считает все вылетающие из препарата частицы, так как сам препарат находится в центре рабочего объема счетчика на столь тонкой подложке (измеряемой десятком микрограммов), что поглощением в ней частиц даже с малой энергией (до 0,1 *Мэв*) можно пренебречь (погрешность менее 1%). Таким образом, при измерениях на 4π-счетчике отпадают поправки на поглощение (для не очень мягких β-частиц) и отражение, геометрический фактор и др. Остаются, конечно, поправки на фон и разрешающую способность.

Следует иметь в виду, что 4π-счетчики пригодны для абсолютного счета только таких радиоактивных веществ, каждый распад которых сопровождается вылетом заряженных частиц.

Несколько типов конструкций 4π-счетчиков представлено на рис. 9. Наиболее удачная из них, пожалуй, конструкция *в*. Поэтому ниже она описывается, а принципиальные особенности других схем ясны из чертежа.

Как видно из рис. 9,*в*, счетчик представляет полый металлический цилиндр, закрытый сверху и снизу плоскими круглыми крышками. Сбоку, посредине цилиндра, имеется щель, в которую вставляется металлическая вставка с радиоактивным препаратом. Эта вставка делит объем счетчика на две половины — верхнюю и нижнюю, в каждой из которых посредине (на $^1/_4$ высоты цилиндра) натянута тонкая вольфрамовая нить (анод), изолированная от цилиндра (катода). Аноды обеих половин счетчика соединяются вместе и включаются, как обычно, на вход усилителя, не боящегося перегрузок. Катод заземляется.

На мишени с препаратом, кроме большого круглого отверстия посредине, затянутого тонкой пленкой, на которую наносят активное вещество (на рисунке зачернено), имеются еще два—четыре отверстия для того, чтобы через счетчик можно было пропускать газовую смесь (счетчик проточного типа). В качестве наполняющего газа применен метан при давлении, на 3—5 *мм рт. ст.* превышающем атмосферное, чтобы предупредить затекание воздуха внутрь счетчика во время работы.

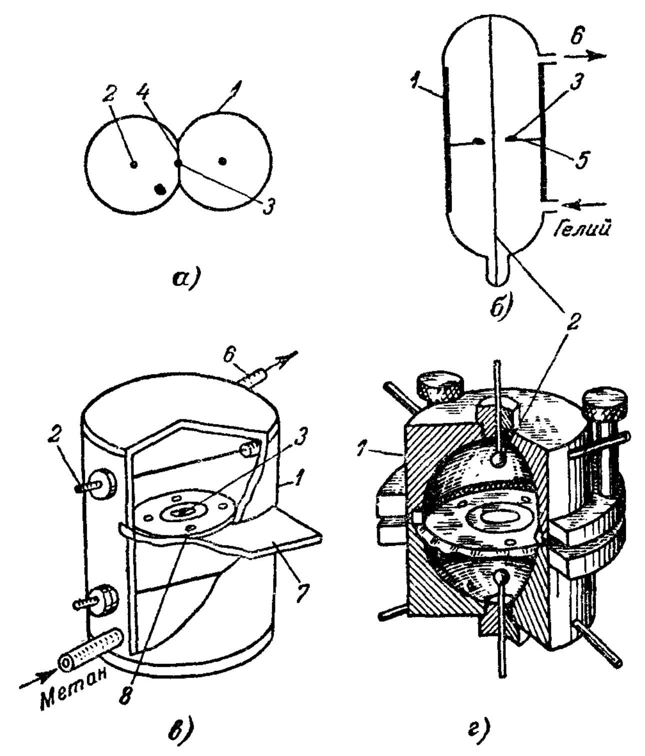


Рис. 9. Различные конструкции 4π-счетчиков.
1 — катод; *2* — анод; *3* — радиоактивное вещество; *4* — пленка; *5* — кольцеобразная мишень; *6* — выход газовой смеси; *7* — вставка с мишенью; *8* — отверстия в мишени для прохода метана.

В отличие от обычных счетчиков наиболее выгодным режимом для счета β-частиц является режим работы в об-

ласти ограниченной пропорциональности, причем 4π-счетчик способен выдерживать интенсивность облучения, в 100 раз бо́льшую, чем обычный цилиндрический счетчик.

Для описанного счетчика плато́ для счета β-частиц в области ограниченной пропорциональности наблюдалось при напряжениях 2 500—3 000 *в*. Натуральный фон за свинцовой защитой составлял 40 *имп/мин*, а в случае применения схемы антисовпадений мог быть понижен до 3—5 *имп/мин*.

Таким образом, счетчик позволял производить абсолютные измерения активности в очень широких пределах с погрешностью 1—3% и эффективностью около 100%.

НЕГАЗОРАЗРЯДНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Кристаллические счетчики. По принципу действия наиболее близки к газоразрядным кристаллические счетчики проводящего типа. Если пространство между электродами газоразрядного прибора заполнить не газом, а кристаллическим диэлектриком или полупроводником, то при прохождении ионизирующей частицы через него появляется импульс тока.

Можно выделить два типа кристаллических счетчиков, имеющих различный механизм действия: счетчики, работающие как фотосопротивления, и счетчики, работающие как фотодиоды.

Первые представляют собой небольшую пластинку кристалла, две противоположные стороны которого металлизированы или покрыты аквадагом (коллоидальный графит) и служат электродами. Влетающая ионизирующая частица создает пары: электроны и «дырки», т. е. место, из которого вырван находившийся там электрон. Под действием электрического поля эти частицы движутся к противоположным электродам. Однако далеко не все электроны и дырки достигают электродов, так как в решетке полупроводника существует много различных ловушек (нарушения правильности кристаллической решетки, вкрапленные атомы примесей и т. п.), захватывающих движущиеся заряды. Кроме того, происходит рекомбинация их с другими электронами и дырками. Тем не менее появившиеся в объеме счетчика заряды создают импульс тока во внешней цепи счетчика. Малые размеры счетчика и относительно большие подвижности электронов и дырок обеспечивают быстрое нарастание фронта импульса (10^{-6}—10^{-7} *сек*). Можно считать, что действие ионизирующей ча-

стицы на такой счетчик подобно действию квантов света на фотосопротивление — при освещении ток через него увеличивается.

Из кристаллов, которые испытывались, можно отметить алмаз, сернистый кадмий и др. Ионные кристаллы — хлористое серебро и др. — могут работать как счетчики только при очень низких температурах, чтобы исключить влияние ионной проводимости.

Второй тип счетчиков представляет собой плоскостной диод из высокоомного монокристалла германия. Его устройство изображено на рис. 10. Путем введения в моно-

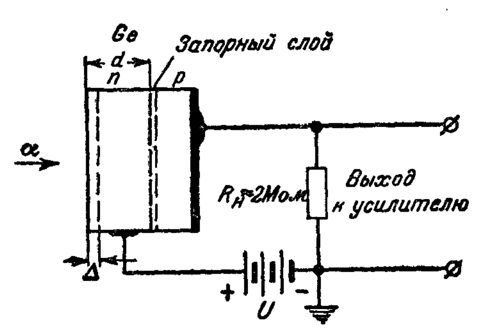


Рис. 10. Кристаллический счетчик с запорным слоем.

кристалл германия атомов некоторых примесей добиваются получения в одной половине кристалла электронной проводимости *n*, в другой — дырочной проводимости *p*. В месте стыка этих областей образуется так называемый запорный слой, через который ток сможет проходить из-за контактной разности потенциалов только в одну сторону.

Если приложенное внешнее напряжение совпадает с направлением контактной разности потенциалов (т. е. плюс на *n*-германии и минус на *p*-германии), то сопротивление запорного слоя еще более возрастает. Это называется включением диода в запорном направлении, при этом в цепи протекает очень слабый обратный ток. При противоположном подключении полюсов источника тока к диоду — в прямом направлении — получаем большой прямой ток.

Рассмотрим теперь поведение такого фотодиода, как счетчика. Пусть в него со стороны *n*-германия попадает α-частица. Уже в небольшом слое Δ (рис. 10) толщиной всего 10—20 *мк* она затормозится, полностью отдав свою

энергию на образование пар электрон — дырка. Дырки через запорный слой легко проходят, и возникает ток в замкнутой цепи *n-p*-кристалл, сопротивление $R_н$ и батарея.

Толщина кристалла выбирается порядка 1—3 *мм*. Толщина слоя *d* не должна превышать длины свободного пути дырок и составляет 0,2—0,3 *мм*.

Так как при прохождении тока через фотодиод на внешнем сопротивлении нагрузки падает почти все напряжение источника тока, удается получить достаточно большие импульсы. Следует также иметь в виду, что такой счетчик имеет «темновой» ток, т. е. ток в отсутствии облучения, — его величина достигает нескольких микроампер.

Заканчивая обзор кристаллических счетчиков, отметим их основные достоинства и недостатки. Основными преимуществами являются: 1) возможность регистрации сильно проникающего жесткого излучения счетчиками малых размеров благодаря большой тормозной способности твердых тел; 2) высокие скорости счета (до 10^6 *имп/сек*) благодаря крутому фронту импульса, что позволяет применять их в схемах совпадений (см. ниже); 3) пропорциональность между высотой импульса и энергией частицы, что позволяет различать частицы по энергиям, как в пропорциональных счетчиках; 4) возможность детектировать частицы и γ-лучи с большей эффективностью, чем при пользовании газоразрядными счетчиками (для γ-лучей порядка 5%, т. е. в 50 раз лучше, чем для газоразрядных).

Основным недостатком кристаллических счетчиков является накопление пространственного заряда, создаваемого захваченными в ловушки электронами и дырками, что приводит с течением времени к уменьшению высоты импульса и скорости счета.

Однако улучшение свойств полупроводников и потребность в чрезвычайно малогабаритных детекторах излучений могут привести к разработке технически удобных кристаллических счетчиков проводящего типа.

Сцинтилляционные счетчики. Возникновение кратковременных вспышек света (сцинтилляций) в кристаллах и других люминесцирующих веществах под действием излучения известно давно. В первый период истории изучения ядерных явлений визуальный счет сцинтилляций сыграл большую роль, однако в дальнейшем был вытеснен более чувствительными и удобными методами (счетчики Гейгера — Мюллера др.). Второе рождение методики счета сцинтилляций произошло в 1947 г., когда ряд ученых применил

фотоэлектронный умножитель[1] (сокращенно ФЭУ). Так возник сцинтилляционный счетчик, которому посвящено большое количество научных работ и исследований.

Каковы же достоинства сцинтилляционных счетчиков? Основных достоинств три: 1) высокая чувствительность (эффективность) ко всем видам ядерных излучений, в том числе и к γ-лучам; 2) большая разрешающая способность (до 10^{-9} *сек*); 3) способность различать частицы по энергии и измерять ее. Таким образом, сцинтилляционный счетчик, соединяя в себе достоинства пропорционального счетчика и счетчика Гейгера — Мюллера, обладает при этом превосходящей их эффективностью и разрешающей способностью.

Счетчик имеет два основных элемента: сцинтиллятор, реагирующий на ядерное излучение вспышками света, и фотоумножитель, преобразующий эти слабые вспышки света в электрические импульсы, которые усиливаются внутри этого же фотоумножителя в миллионы раз и более. На рис. 11, кроме этих основных элементов, показан также световод. Его назначение подводить свет от сцинтиллятора к фотокатоду ФЭУ. На этом рисунке также приведены цоколевка и схема включения наиболее распространенного фотоумножителя типа ФЭУ-19.

Действие сцинтилляционного счетчика происходит следующим образом. Частица или γ-квант попадают в сцинтиллятор и взаимодействуют с атомами плотной среды сцинтиллятора. При этом некоторое количество атомов вещества, составляющего сцинтиллятор, переходит в возбужденное состояние. Обратный переход атомов в нормальное состояние сопровождается испусканием света — люминесценцией. Различают два вида люминесценции: флуоресценцию и фосфоресценцию. В первом случае высвечивание атома происходит почти мгновенно после возбуждения (10^{-9}—10^{-7} *сек*), во втором — возбужденные молекулы находятся в метастабильном состоянии неопределенное время. Только некоторая добавочная энергия, полученная, например, от столкновений с другими атомами при обычном тепловом движении, позволяет возбужденным атомам перейти из метастабильного состояния в нормальное с испусканием светового кванта. В среднем это происходит за время порядка 10^{-5}—10^{-4} *сек*, т. е. в тысячи раз более длительное, чем при флуоресценции. Фосфóрами при-

[1] Первый фотоумножитель разработан Л. А. Кубецким в 1930 г.

нято называть вещества, обладающие как флуоресценцией, так и фосфоресценцией.

Для сцинтилляционных счетчиков пригодны, очевидно, фосфóры, обладающие флуоресценцией, т. е. коротким временем высвечивания. В энергию фотонов превращается только малая часть всей поглощенной в сцинтилляторе энергии частицы. При этом возникает от нескольких десят-

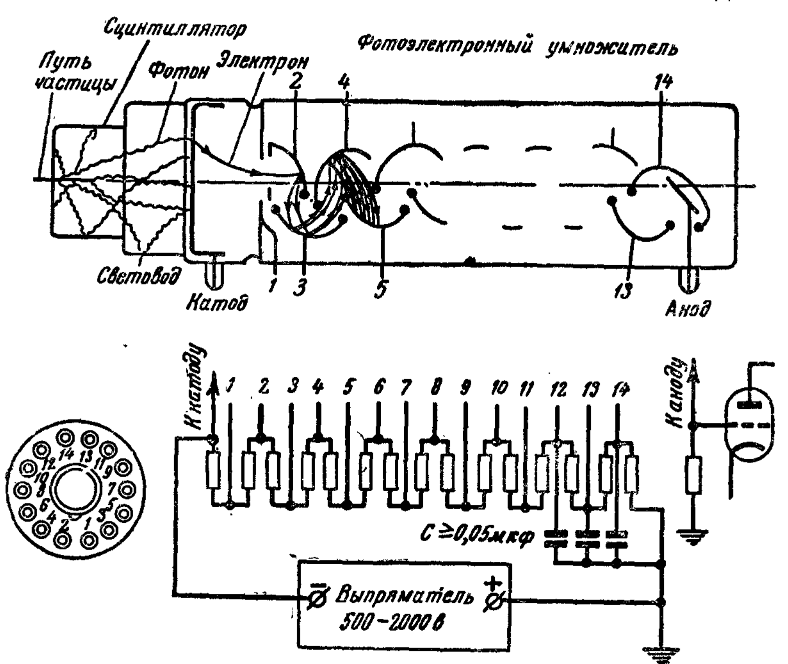


Рис. 11. Схема устройства и включения сцинтилляционного счетчика.

Цифры 1 — 14 означают номера штырьков цоколя ФЭУ.

ков до нескольких десятков тысяч фотонов. Фотоны разлетаются во все стороны, частично поглощаясь в толще кристалла. Поэтому только часть фотонов попадает из сцинтиллятора на фотоумножитель. Для увеличения числа фотонов, достигающих катода, следует улучшить отражение от всех стенок сцинтиллятора, кроме контактирующей с фотокатодом. Хорошие результаты дает помещение кристаллов в порошок магнезии.

Фотоумножитель является прибором, соединяющим в себе фотоэлемент и электронный усилитель, действие ко-

торого основано на явлении вторичной электронной эмиссии. Фотоны из сцинтиллятора попадают на фотокатод ФЭУ. При этом удается получить до одного электрона на каждые четыре фотона, используя чувствительный сурьмяноцезиевый катод. Обычно же эффективность преобразования фотокатодом падающих фотонов в электроны составляет только несколько процентов ($\sim 5\%$). В фотоумножителях для сцинтилляционных счетчиков фотокатод большей частью наносится в виде полупрозрачного слоя на торцовой части стеклянного баллона ФЭУ.

Электроны, вылетевшие из фотокатода, ускоряются электрическим полем и через диафрагму устремляются на первый электрод (динод) умножителя. Вследствие вторичной электронной эмиссии каждый упавший электрон выбивает из динода несколько вторичных электронов в зависимости от приложенной между электродами разности потенциалов. Эти электроны, находясь в поле притяжения второго динода, также ускоряются и вызывают вторичную электронную эмиссию на следующем диноде. Этот процесс повторяется на всех последующих динодах ФЭУ. Последним электродом в этой цепи служит анод, который для устранения ненужной теперь вторичной эмиссии электронов иногда выполняют в виде сетки и окружают экраном, соединенным с предпоследним электродом (рис. 11). Таким образом, на каждом диноде умножителя с идентичными ячейками происходит увеличение числа электронов в определенное число раз σ (коэффициент вторичной эмиссии). Полное усиление умножителя M определяется усилением одного каскада σ в степени, равной числу каскадов n

$$M=\sigma^n$$

и уже при $\sigma=3$, а $n=13$ достигает величины $\sim 1{,}5\cdot 10^6$. В результате на выходе возникает импульс напряжения порядка 100 *в*, который подается без предварительного усиления прямо на сетку входной лампы счетной схемы.

Очевидно, что свойства сцинтилляционного счетчика, его чувствительность, разрешающая способность и т. п. определяются параметрами как сцинтиллятора, так и фотоэлектронного умножителя.

Наша промышленность выпускает несколько типов фотоумножителей, основные параметры которых приведены в табл. 1 и 2.

Наиболее широко для счета сцинтилляций в настоящее время применяется фотоумножитель типа ФЭУ-19. На

Таблица 1

Обозначения фотоумножителя[1]	Назначение	Катод				Чувствительность фотокатода[2] (не ниже), *мка/лм*		Статические параметры: Средний темновой ток катода[3] при различной анодной чувствительности Σ_a, *а/лм*, и напряжении U (не выше), *в*				Число динодов	Максимальное напряжение между анодом и катодом, *в*	Распределение напряжения между динодами[4]	Амплитудное разрешение, %	Диаметр, *мм*	Длина, *мм*
		Тип	Рабочая площадь, *см²*	Область спектральной чувствительности, Å	Максимум спектральной чувствительности, Å	интегральная	синяя	$\Sigma_a = 1$	$\Sigma_a = 10$	$\Sigma_a = 100$	$\Sigma_a = 1\,000$						
ФЭУ-19	Для индикаторов излучения	Полупрозрачный сурьмяно-цезиевый несенсибилизированный на торцовой поверхности колбы	9	3 500—6 000	3 800—4 200	35	5	$3\cdot10^{-10}$ при U=900	$3\cdot10^{-9}$ при U=1 150	$3\cdot10^{-8}$ при U=1 500	$8\cdot10^{-7}$ при U=1 000	13	2 600	Равномерное	10	48	195
ФЭУ-24	Для индикаторов повышенной чувствительности	То же, с электростатической фокусировкой	43	3 200—6 000	3 800—4 200	35	5	—	$3\cdot10^{-7}$ при U=1 600	—	—	13	—	Неравномерное	14	80	235
ФЭУ-25	Для малогабаритных индикаторов	То же, что у ФЭУ-19	5	3 500—6 000	3 800—4 200	30	—	$3\cdot10^{-9}$ при U=1 000	$6\cdot10^{-8}$ при U=1 400	—	—	9	1 600	Равномерное	—	34	109
ФЭУ-29	Для гамма-спектрометрии (хорошее амплитудное разрешение)	То же, что у ФЭУ-19	9	3 000—6 000	—	30	6	—	$3\cdot10^{-8}$ при U=1 400	—	—	13	2 300	Неравномерное	9	48	195
ФЭУ-33[5]	Для измерений временных соотношений (хорошее временное разрешение)	То же, что у ФЭУ-19	9	3 000—6 000	—	30	—	—	—	$1\cdot10^{-6}$ при U=2 100	$2\cdot15^{-5}$ при U=2 900	13	2 900	То же	9,5	48	195

[1] Для всех ФЭУ температурные пределы работы от —50 до +50° С при влажности до 85%, долговечность 1 000 *ч*.

[2] Чувствительность фотокатода интегральная (белая) определяется по источнику ета с цветовой температурой t=2 848° К, а синяя—как отношение фототока (в микроамперах) к световому потоку (в люменах) от того же источника света, падающему на иний светофильтр из стекла ФС-6, помещенного перед катодом.

[3] Максимальное значение темнового тока у отдельных экземпляров ФЭУ может ыть приблизительно в 10—50 раз больше.

[4] Диноды имеют корытообразную форму, фокусировка линейная электростатичеая, распределение напряжения на электродах указывается в паспорте, при равномерном распределении изготовителем рекомендуется брать сопротивление звена делителя жду соседними динодами не более 0,25 *Мом*.

[5] Наличие в системе умножителя специальных электродов (сеток) обеспечивает рошее временное разрешение (не хуже $4\cdot10^{-9}$) и большую величину тока в импульсах (не ниже 0,3 *а*).

рис. 12 приводится типовая зависимость основных его параметров от режима работы, а на рис. 13 изображена шумовая счетная характеристика.

Поясним смысл некоторых параметров фотоумножителей. Фотокатод характеризуется, во-первых, интегральной чувствительностью, т. е. величиной фототока в микроамперах, вызванного световым потоком в один люмен, или эффективностью, показывающей, какой процент падающих на катод квантов вырывает фотоэлектроны; во-вторых, спектральной характеристикой, показывающей величину

возникающего фототока при облучении световыми волнами различной длины (цвета). Наибольшую чувствительность, как показано на рис. 14, полупрозрачный сурьмяно-цезиевый катод имеет в синей части видимого спектра ($\lambda\approx$ $\approx$4 200 Å).

Важнейшими параметрами фотоумножителя в целом являются анодная чувствительность и темновой ток, которые зависят от режима работы.

Анодная чувствительность Σ_a определяется отношением анодного тока в амперах к световому потоку в люме-

Таблица 2

Обозначение фотоумножителя	Назначение	Диаметр рабочей части катода, *мм*	Рабочее напряжение между катодом и анодом, *в*	Коэффициент усиления M' (при рабочем напряжении)	Темновой ток $I_т$, *мка*	Временное разрешение, 10^{-9} *сек*	Амплитудное разрешение, %	Число динодов и фокусирующих электродов	Максимальное напряжение, *в*	Диаметр рабочего торца/цоколя, *мм*	Длина, *мм*
ФЭУ-1С	Амплитудное разрешение для спектрометров	40	1 850	$5\cdot10^5$	0,1	—	7—9	11+2	2 200	48	205
ФЭУ-1Б	Амплитудное разрешение	75	1 800	$5\cdot10^5$	0,1	—	7—10	11+2	2 200	80/48	240
ФЭУ-2Б	То же	145	1 800	$5\cdot10^5$	0,1	—	7—9	11+2	2 200	150/48	310
ФЭУ-3Б	„ „	195	1 800	$5\cdot10^5$	0,1	—	7—10	11+2	2 200	200/48	340
ФЭУ-1В	Временное разрешение	39	2 300	$5\cdot10^6$	0,1	1,5—3	—	10+2	2 500	48	169
ФЭУ-2В	То же	41	2 600	10^7	0,1	1,5—3	—	12+2	2 800	50	173
ФЭУ-1Б1В	Временное и амплитудное разрешение	75	2 300	$5\cdot10^6$	0,1	1,5—3	—	10+2	2 500	80/48	230
ФЭУ-3М	Малогабаритный для амплитудного разрешения	15	1 500	10^5	0,5	—	7—9	8+1	2 000	19	91
ФЭУ-12	Универсальный	—	1 600	10^6	—	—	—	12	2 500	—	—
ФЭУ-11	То же	—	2 200	10^7	—	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Катод у фотоумножителей полупрозрачный, сурьмяно-цезиевый на торце колбы, с электростатической фокусировкой, для спектральной области 3 500—6 500 Å с максимумом чувствительности около 4 000 Å. Интегральная чувствительность фотокатода в пределах 30—80 *мка/лм*, при средней чувствительности 60 *мка/лм*.

2. Фокусировка динодов электростатическая, распределение напряжения между ними указывается в паспорте, у ФЭУ-11 и ФЭУ-12 диноды типа жалюзи, а у остальных коробчатые.

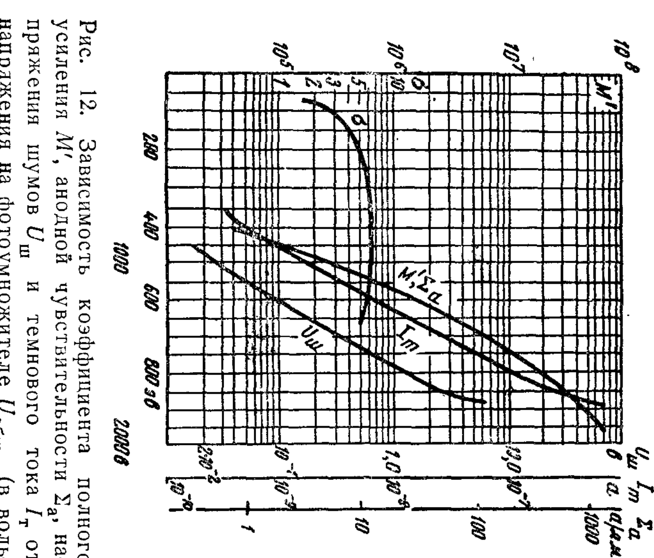


Рис. 12. Зависимость коэффициента полного усиления M', анодной чувствительности $\Sigma_а$, напряжения шумов $U_ш$ и темнового тока $I_т$ от напряжения на фотоумножителе $U_{общ}$ (в вольтах) и коэффициента вторичной эмиссии σ от энергии электронов (в электрон-вольтах).

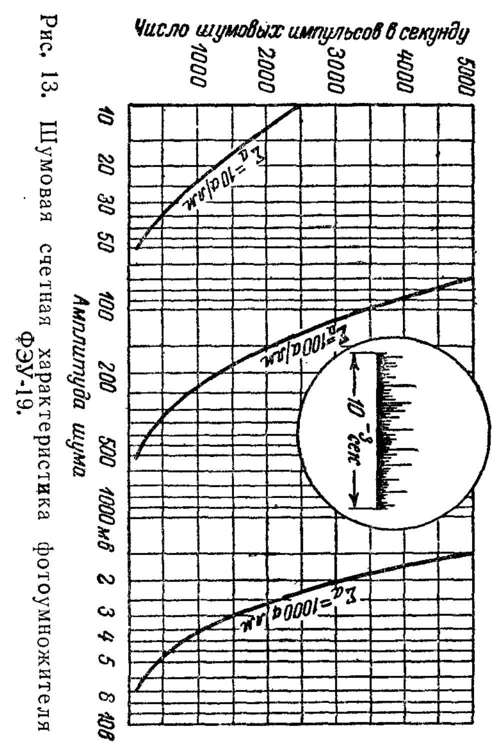


Рис. 13. Шумовая счетная характеристика фотоумножителя ФЭУ-19.

нах, который его вызвал. Для многих типов ФЭУ Σ_a достигает 1 000 *а/лм*. Однако максимальный анодный ток в ФЭУ ограничивается несколькими миллиамперами. При больших световых потоках сказывается явление «утомления», т. е. уменьшение числа вторичных электронов, и это резко снижает коэффициент усиления фотоумножителя. Нижний предел чувствительности ФЭУ определяется так называемым темновым током, протекающим в анодной цепи умножителя при неосвещенном катоде. Темновой ток вызывается самопроизвольной эмиссией электронов с фо-

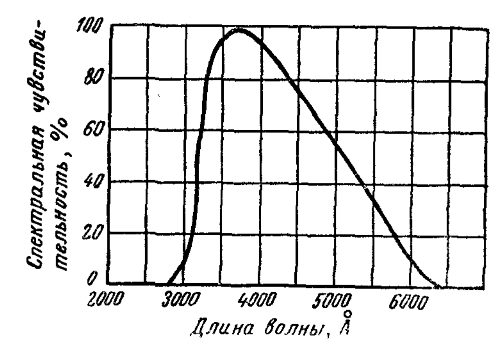


Рис. 14. Спектральная чувствительность полупрозрачного сурьмяно-цезиевого фотокатода.

токатода и первых динодов. Эти электроны, размноженные последующими каскадами умножителя, создают в анодной цепи шумовые импульсы — темновой ток. Для регистрации сцинтилляций необходимо, чтобы амплитуда рабочего импульса была больше амплитуды шумовых импульсов, в противном случае нужно использовать схему совпадений, способную выделить рабочий импульс, одновременно возникающий в двух ФЭУ, из фона шумовых импульсов. На рис. 12 и 13 представлены зависимости величины темнового тока и числа шумовых импульсов от режима работы ФЭУ.

Вследствие неизбежных флуктуаций числа фотоэлектронов, вылетающих из катода при действии вспышек света одинаковой яркости, и шумов на выходе ФЭУ возникают импульсы различной амплитуды, и наоборот, импульсы одинаковой амплитуды будут соответствовать различным яркостям. Таким образом, умножитель не будет различать некоторой разности яркостей. Это свойство ФЭУ характеризуют так называемым амплитудным разрешением R, которое определяется отношением

$$R = \frac{\Delta U}{U} 100 \, [\%],$$

где U — средняя амплитуда сигнала на выходе под влиянием одинаковых световых вспышек;

ΔU — разность амплитуд тех импульсов, которые появляются вдвое реже, чем импульсы средней величины при постоянном излучении (рис. 15).

Следует также упомянуть, что сам фотоумножитель (без сцинтиллятора) может служить в ряде случаев в качестве чувствительного детектора ядерных излучений. При этом частицы и кванты воспринимаются непосредственно фотокатодом ФЭУ.

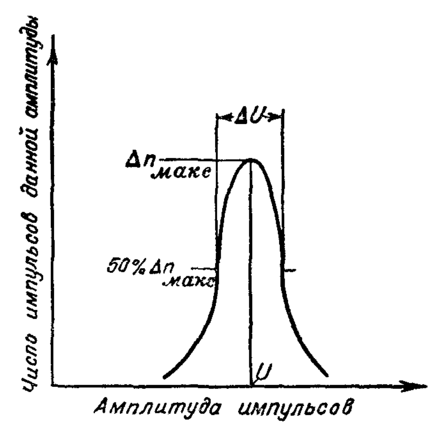


Рис. 15. Амплитудное разрешение фотоумножителя.

Отметим несколько практических деталей. Умножитель необходимо защищать от внешних магнитных и электрических полей и от попадания постороннего излучения (света) на электроды. Желательно поддерживать постоянную температуру, так как нагрев приводит к увеличению темнового тока. Необходимо добиваться хорошего оптического контакта фотокатода со световодом или сцинтиллятором, для чего обычно между торцом блока ФЭУ и сцинтиллятором (световодом) вводят немного прозрачной жидкости, имеющей показатель преломления, близкий к показателю преломления стекла, например вазелиновое или кедровое масло.

Успешная работа сцинтилляционного счетчика в большей мере зависит от сцинтиллятора.

В настоящее время применяются следующие сцинтилляторы: неорганические кристаллы (активированный таллием иодистый натрий, активированный серебром сернистый цинк и др.), органические кристаллы (нафталин, антрацен.

стильбен и др.), жидкие фосфоры (раствор терфенила в ксилоле или толуоле и др.) и пластмассы (твердые растворы антрацена, терфенила в полистироле и др.).

В органических кристаллах сцинтилляция является результатом высвечивания отдельной возбужденной молекулы фосфора, поэтому органические фосфоры могут сцинтиллировать в жидком, твердом и газообразном состоянии с временем высвечивания $\sim 10^{-8}$ *сек.* У неорганических кристаллов свойство сцинтиллировать является свойством всей совокупности молекул в кристаллической решетке, а не отдельной молекулы. Такие кристаллы, как правило, обладают свойствами полупроводников. При поглощении энергии излучения некоторые внешние электроны переходят в свободное проводящее состояние, в котором могут находиться относительно длительное время ($\sim 10^{-6}$ *сек*), пока не встретят на своем пути какой-нибудь центр рекомбинации (атом примеси и т. п.) и не высветят часть своей энергии.

Наша промышленность изготовляет в массовом производстве сцинтилляционные кристаллы различных типов: нафталин, стильбен, антрацен, толан, иодистые натрий, калий и цезий и др.

В табл. 3 приведены некоторые основные характеристики наиболее интересных сцинтилляторов.

Как видно из табл. 3, наиболее коротким временем высвечивания обладают жидкие сцинтилляторы, наибольшим — неорганические кристаллы.

При выборе фосфóра и конструкции сцинтилляционного счетчика следует исходить из его назначения. Так, для счета α-частиц, имеющих малую проникающую способность, следует брать тонкий слой мелкокристаллического сернистого цинка, активированного серебром, для γ-квантов и β-частиц высоких энергий следует брать кристаллы большого объема иодистого натрия, активированного таллием, или жидкие сцинтилляторы, для β-частиц малых и средних энергий (до 3—5 *Мэв*) удобны антрацен и стильбен.

В заключение отметим некоторые недостатки сцинтилляционных счетчиков. Наличие шумов ФЭУ ухудшает амплитудное разрешение и требует специальных мер борьбы с фоном — осложнения электронных схем (схемы совпадения) или сильного охлаждения ФЭУ. Отметим еще, что при больших скоростях счета наблюдается зависимость амплитуды импульса от скорости счета.

Таблица 3

Вещество сцинтиллятора	Показатель преломления	Максимум спектра сцинтилляции, Å	Время высвечивания 10^{-9}, *сек*	Относительная эффективность к различным ядерным излучениям[1]			Относительная амплитуда импульса[1]	Рекомендуется для регистрации
				α	β	γ		
Иодистый натрий	1,77	4 100	250	—	210	—	—	γ и β
Сернистый цинк	—	5 200	10 000	100	—	100	—	α
Антрацен . . . . **Стильбен**	1,59 —	4 400 4 080 и 4 200	36 6—8	4,3 —	100 65	71 —	100 45	*Лучшие для β (средние и мягкие)*
Раствор трефенила в ксилоле	1,50	4 000	3	—	34	—	14	—
Твердый раствор тетрафенилбутадиена в полистироле	1,59	4 000	5	—	37	—	—	—

[1] Для β-частиц относительные величины приведены по отношению к антрацену, для α-частиц и γ-лучей—по отношению к сернистому цинку, для которых эта величина принята за 100.

Черенковские счетчики. Регистрировать быстро движущиеся заряженные частицы можно по эффекту Черенкова.

Явление Вавилова — Черенкова заключается в возникновении видимого излучения при движении очень быстрой заряженной частицы через вещество. Известно, что свет в веществе распространяется со скоростью, меньшей чем в пустоте. Поэтому скорость частицы может превышать скорость света в данной среде, но в то же время остается меньше скорости света в вакууме. Наблюдается интересное явление — частица обгоняет свет, ею же излучаемый.

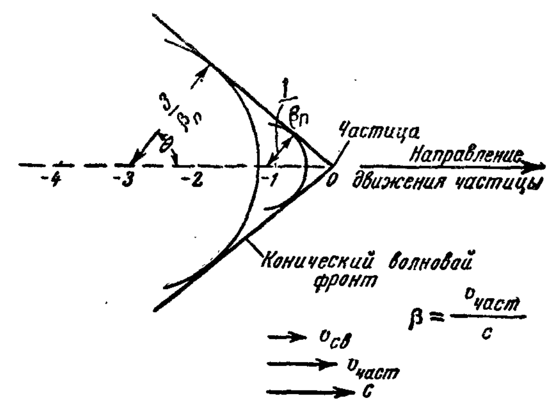


Рис. 16. Возникновение фронта волны черенковского излучения.

Грубое представление о механизме образования ударной световой волны можно получить, наблюдая волну, возникающую около носа лодки. При очень медленном движении носовая волна не образуется. По мере увеличения скорости появляется круговая волна, убегающая вперед быстрее лодки. При еще бо́льшей скорости нос лодки догоняет и обгоняет эту волну, причем образуется клин из двух отстающих от носа лодки волн. Чем больше скорость лодки, тем у́же клин и больше волна.

Особенностью свечения Черенкова является то, что его можно видеть только при наблюдении в определенных направлениях, так как черенковский свет распространяется не во все стороны от источника, а лишь в определенном конусе направлений, открытом вперед по направлению движения частицы. Угол раствора этого конуса будет тем больше, чем больше скорость частицы превышает скорость распространения света. На рис. 16 показан простейший

способ построения фронта световой волны черенковского излучения, который имеет конический вид. В условном масштабе показан путь частицы за единицу времени (скорость частицы $v_{част}$) и путь, пройденный за это же время шаровой световой волной (скорость света в данной среде $v_{св}$). В результате интерференции всей совокупности световых волн, излученных из всех точек, пройденных частицей, получаем фронт волны, который совпадает с касательной, проведенной из конечной точки нахождения частицы к шаровой волне, излученной из начальной точки.

Половинный угол θ раствора конуса, в котором наблюдается свечение Черенкова при движении частицы со скоростью $v_{част}$, находится по формуле

$$\cos\theta = \frac{v_{св}}{v_{част}}.$$

Выражая скорость света в веществе $v_{св}$ через показатель преломления среды n и скорость света в пустоте c отношением $v_{св} = \frac{c}{n}$, получаем:

$$\cos\theta = \frac{c}{v_{част} n}.$$

Таким образом, величина угла θ зависит от скорости частицы $v_{част}$ и вещества среды, в которой она движется (n). Чем больше скорость частицы и чем больше показатель преломления, тем больше угол θ и тем острее вершина конуса фронта ударной световой волны.

Для регистрации излучения Черенкова, которое указывает на присутствие движущейся частицы, служат специальные устройства, светочувствительным элементом которых, как и у сцинтилляционных счетчиков, является фотоумножитель. Все устройство в целом будем называть счетчиком Черенкова. Основные части счетчика Черенкова: радиатор — сосуд, заполненный прозрачным веществом, в котором возникает свечение Черенкова, и фотоумножитель, катод которого расположен на торце радиатора, противоположном входу частиц (рис. 17). Чтобы получить бо́льшую чувствительность, фотокатод должен быть возможно большей площади, а стенки сосуда посеребрены, чтобы хорошо отражать свет.

Счетчики этого типа (без фокусировки) имеют достаточно малую длительность импульса, меньше 10^{-9} *сек*, что позволяет улучшить разрешающую способность при работе со схемами совпадений. Соответствующий выбор светящегося вещества дает возможность использовать их как «пороговые» счетчики, когда необходимо считать только те частицы, энергия которых выше некоторого значения. Используя свойства пропорциональности амплитуды импульса интенсивности черенковского излучения, можно определять скорости частиц и их заряды. Наконец, счетчики

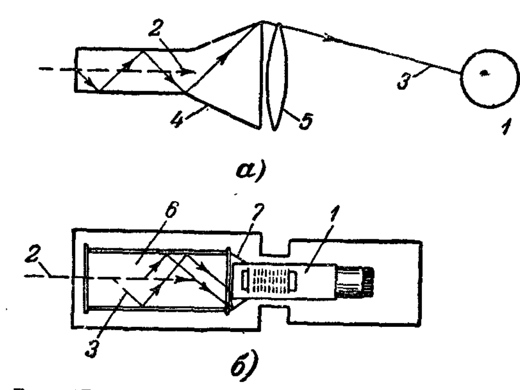


Рис. 17. Основные типы счетчиков Черенкова.
а — с фокусировкой; *б* — без фокусировки; *1* — фотоумножитель; *2* — траектория быстрой частицы; *3* — черенковское излучение; *4* — цилиндр и конус из органического стекла; *5* — линза; *6* — сосуд с водой; *7* — конус для собирания света на фотокатод.

с газовым наполнением сосуда обеспечивают очень малый ($1 \div 2°$) угол θ, т. е. тот угол, внутри которого распространяется световое излучение, и поэтому могут являться селекторами направлений, по которым приходят частицы.

Счетчики с фокусировкой, в которых с помощью линз, диафрагм и т. п. на фотокатод собирается свет, идущий только под определенным черенковским углом, могут также служить для счета частиц, обладающих скоростями в узком интервале значений (селекторы частиц по скоростям).

Заканчивая рассмотрение черенковских счетчиков, следует сказать, что в настоящее время они еще не получили широкого технического применения, но имеют большое значение для исследовательских работ с очень быстрыми частицами.

СЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТЫ СЧЕТНЫХ СХЕМ

Типы счетных устройств. Необходимость подсчитывать число электрических импульсов существует в различных областях науки и техники. Для этих целей служат электронные счетные устройства.

Счетные устройства делятся на два типа: измерители счета, т. е. полного числа импульсов, пришедших на вход устройства за все время измерений, и измерители скорости счета, т. е. среднего числа импульсов в единицу времени, поступающих на вход счетного устройства. Счетные устройства, служащие для измерений радиоактивности препаратов, называют радиометрами.

Обычно счетное устройство состоит из газонаполненного счетчика, в котором возникают импульсы ионизационного тока, ламповой схемы, усиливающей и формирующей импульсы, и регистрирующего прибора — чаще всего электромеханического счетчика. Электромеханические счетчики обладают большой инерционностью. Максимальная скорость их счета порядка 100 *имп/сек*. Поэтому между механическим счетчиком и усилителем включают специальную пересчетную схему, которая позволяет подавать на электромеханический счетчик только импульсы, кратные установленному коэффициенту пересчета. Схемы пересчета являются наиболее характерной частью измерителей счета.

Для непосредственного определения скорости счета в измерителях скорости счета на выходе устройства включают стрелочный прибор. Если установлены определенные условия измерений препаратов, шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах активности — в микрокюри или в числе распадов в единицу времени.

Очевидно, что между усилителем импульсов и вольтметром должно находиться специальное электрическое устройство, которое создавало бы на своем выходе напряжение, пропорциональное среднему числу приходящих в единицу времени импульсов. Именно эти суммирующие и усредняющие по времени схемы являются наиболее характерной частью измерителей скорости счета.

Суммирующие и усредняющие по времени устройства. В большинстве случаев действие этих устройств основано на работе так называемого интегрирующего контура. На рис. 18 дана схема интегрирующего контура и показано напряжение на выходе при поступлении на вход импуль-

сов. Диод, включенный на входе схемы, легко пропускает импульсы тока к конденсатору и в то же время не дает ему разряжаться, так как не пропускает ток в обратном направлении. С другой стороны, конденсатор непрерывно разряжается через сопротивление R. Разряд конденсатора происходит значительно медленнее, чем заряд, так как сопротивление R намного больше прямого сопротивления диода r.

По мере накопления заряда на конденсаторе, а следовательно, и увеличения напряжения U_C на нем процесс заряда происходит все медленнее, а процесс разряда про-

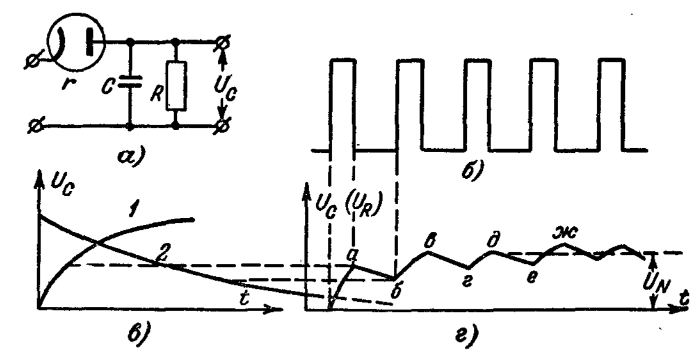


Рис. 18. Принцип действия интегрирующего контура.

а — схема контура; *б* — импульсы, подзаряжающие конденсатор C; *в* — изменение напряжения на конденсаторе C (*1* — при заряде через малое сопротивление r, *2* — при разряде через большое сопротивление R): *г* — процесс установления среднего напряжения U_N на конденсаторе C.

исходит все быстрее и быстрее (см. график заряда и разряда на рис. 18). На том же рисунке показан процесс установления напряжения на конденсаторе U_C, пропорционального среднему числу импульсов в единицу времени. Сверху изображены импульсы тока, заряжающего конденсатор, частота которых зависит от активности препарата. Первый импульс заряжает конденсатор до величины U_C, равной *а*; затем до прихода второго импульса конденсатор разряжается через сопротивление R до напряжения *б*. Второй импульс подзаряжает его до напряжения *в* и т. д. до тех пор, пока не установится такой режим, при котором увеличение напряжения U_C на конденсаторе при приходе импульса будет лишь компенсировать падение этого напряжения за промежуток времени между импульсами. Таким образом, устанавливается некоторое среднее напряжение (пунктирная линия $\overline{U}_N$), соответствующее определенной частоте прихода заряжающих импульсов на конденсатор. Если импульсы будут приходить чаще (большая скорость счета), $\overline{U}_N$ повысится, если реже — $\overline{U}_N$ понизится.

Понятно, что для высокой точности измерений все импульсы должны быть строго одинаковыми по амплитуде и длительности. Измеряя таким образом среднее установившееся напряжение $\overline{U}_N$, мы будем определять среднее число импульсов в единицу времени (т. е. скорость счета).

Пересчетные схемы. Бинарный пересчет. Принцип действия пересчетных устройств состоит в многократном последовательном делении числа поступающих импульсов. Тогда полученные на выходе устройства импульсы появляются достаточно редко, так что их регистрация механическим устройством не представляет затруднений.

Обычно применяют два типа пересчетных устройств: ламповые схемы и специальные пересчетные вакуумные или газонаполненные приборы. В основу построения ламповых пересчетных схем положены различные варианты схем с двумя устойчивыми состояниями.

Каждая пересчетная ячейка представляет собой триггерный (спусковой) каскад, имеющий два устойчивых положения. Первый приходящий импульс переводит его во второе устойчивое состояние, а второй — в исходное. Если при этом возникающий на выходе уже только один импульс передается по схеме дальше, то тем самым осуществляет пересчет или деление на два. В последующую часть схемы будет проходить только каждый второй импульс, а общее число их будет вдвое меньше числа поступающих на первый каскад. Следующий каскад передаст только второй поступивший на него импульс, т. е. четвертый из поступивших на первый каскад. Если последовательно соединены N пересчетных каскадов, то общий коэффициент пересчета будет равен 2^N. Пересчет на два называется бинарным.

Рассмотрим подробнее работу пересчетной ячейки. На рис. 19 представлены две пересчетные ячейки, собранные на двойных триодах. Каждая ячейка является, по существу, двухкаскадным усилителем на сопротивлениях с сильной положительной обратной связью между анодом второго каскада и сеткой первого. Режим работы выбран так, что либо левый триод проводит, а правый закрыт, либо на-

оборот. Каскад ведет себя как реле, перебрасывающееся из одного положения в другое. Сигналом для такого переброса является спусковой импульс, который в рассматриваемом варианте схемы является положительным и поступает на общий катод обоих триодов.

Пусть в исходном состоянии правый триод первой лампы открыт, а левый закрыт. Тогда, как видно из диаграм-

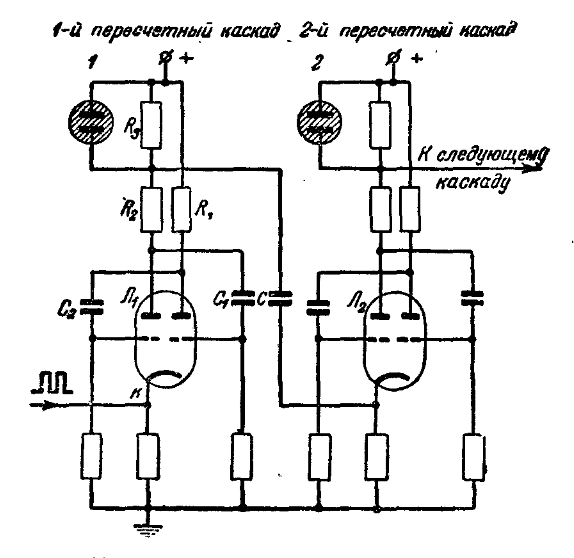


Рис. 19. Принципиальная схема двух триггерных ячеек при пересчете на „два". Сумма цифр над горящими неоновыми лампами „1", „2" . . . показывает число поступивших импульсов.

мы напряжений рис. 20,*а*, сетка первого триода находится под большим отрицательным относительно катода потенциалом, а сетка правого триода — под небольшим положительным. Потенциал правого анода U_{a2} значительно ниже, чем у левого U_{a1}.

Приход отрицательного импульса на катод (диаграмма рис. 20,*б*) не изменит положения, так как добавочный отрицательный импульс на катоде только увеличит положительный относительно катода потенциал сетки правой лампы (лампа остается открытой) и хотя несколько уменьшит отрицательный потенциал на сетке левой лампы, но не настолько, чтобы левый триод стал отпираться.

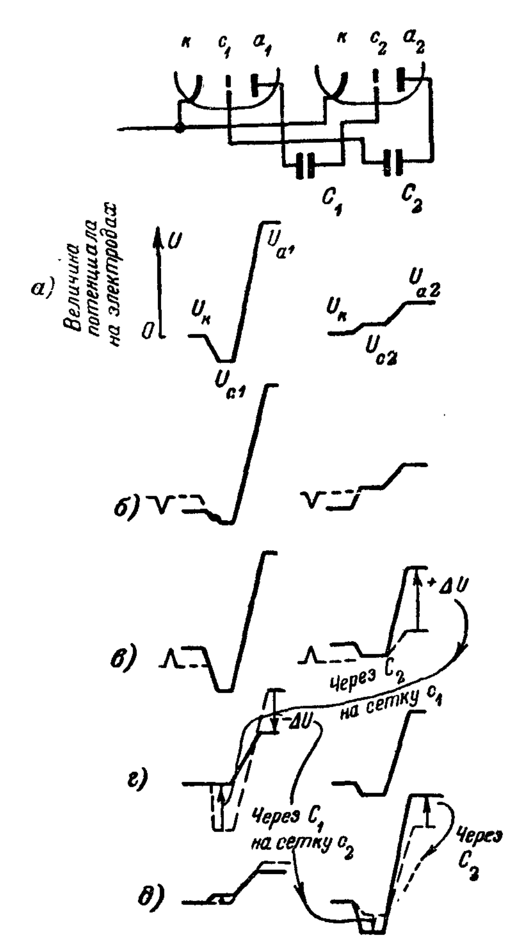


Рис. 20. Распределение потенциалов на электродах триодов бинарной пересчетной ячейки.

а — исходное состояние (левый триод закрыт, а правый открыт); *б* — приход отрицательного импульса на катод состояния системы не изменяет; *в*, *г* и *д* — приход положительного импульса перебрасывает триггер во второе устойчивое состояние (левый триод открыт, а правый закрыт).

Сплошной линией изображено действительное состояние в данный момент, а штриховой — предшествующее состояние. За нулевой потенциал в каждое мгновение принимается потенциал катода.

Совсем по-иному ведет себя схема в случае прихода на катод положительного импульса (рис. 20,*в*). Положительный импульс на катоде правого триода равнозначен такому же отрицательному импульсу на его сетке. Следовательно, сила тока, протекающего через правую половину лампы, начнет убывать, а напряжение на ее аноде быстро возрастать, положительный импульс напряжения $+\Delta U$ через конденсатор обратной связи C_2 поступит на сетку левого триода и откроет его (рис. 20,*г*). Это, в свою очередь, вызывает снижение потенциала на аноде левого триода $(-\Delta U')$ и, следовательно, передачу отрицательного импульса через конденсатор связи C_1 на сетку правого триода (рис. 20,*г*, *д*), что окончательно закрывает правый триод (сплошная линия на рис. 20,*д*).

Таким образом, триггер перебрасывается во второе устойчивое состояние: левый триод открыт, а правый закрыт. При этом загорается неоновая лампочка с цифрой «1», включенная параллельно анодной нагрузке левого триода. Ячейка отсчитала один импульс. Приход второго положительного импульса точно таким же образом закрывает левый триод и открывает правый, т. е. перебрасывает триггер в исходное положение. При этом через конденсатор C поступает положительный импульс на второй пересчетный каскад. Там также закрывается правый триод, открывается левый и загорается неоновая лампочка с цифрой «2». Пересчетная система отсчитала два импульса. Следующий, третий импульс отсчитывается только в первой ячейке, так как отрицательный импульс напряжения, передаваемый через конденсатор C на катод второго каскада, не оказывает на него влияния, и только четвертый импульс возвращает оба каскада в исходное положение. Теперь уже на третий каскад поступает первый положительный импульс, триггер перебрасывается и зажигается неоновая лампочка с цифрой «4» и т. д.

Пересчетные ячейки с успехом могут быть выполнены на полупроводниковых приборах. На рис. 21 представлена практическая схема пересчетной ячейки, разработанная Гольбеком и Вяльшиным.

Бинарный пересчет обладает одним существенным недостатком. Поскольку в настоящее время принята десятичная система исчисления, в основе которой лежит число десять, результаты счета импульсов, полученные на электромеханическом счетчике, необходимо умножить на коэффициент пересчета, например 16 или 64. Этого можно было бы избежать, если бы коэффициент пересчета был кратен 10. Тогда все свелось бы к простому отсчету показаний прибора и приписыванию нужного количества нулей. Поэтому в последнее время широкое распространение получили декадные пересчетные системы.

Декадный пересчет. Мы ограничимся рассмотрением одного варианта ламповых декадных пересчетных схем, в основе которых лежит та же триггерная ячейка, дающая пересчет на два. По существу это обычная бинарная система с пересчетом на 16, у которой путем применения

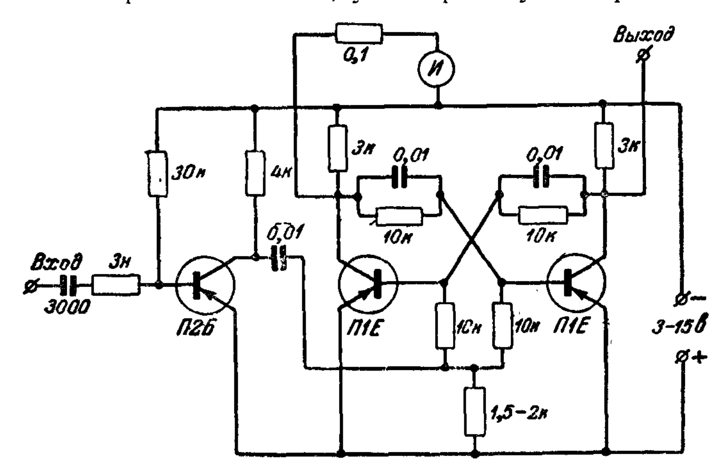


Рис. 21. Схема бинарной пересчетной ячейки на полупроводниковых приборах.

обратных связей пересчет понижен до 10. На рис. 22 представлена такая несколько упрощенная схема.

Запуск триггерной ячейки в отличие от рассмотренного ранее случая производится отрицательным импульсом. Запускающий импульс подается на сетки обоих триодов через отдельные диоды $Д_1$ и $Д_2$ (аналогично в последующих каскадах). Для удобства будем считать, что в начале счета правые триоды открыты, а левые закрыты.

Поскольку до прихода девятого импульса никаких различий в работе декадной и бинарной схем при пересчете на 16 нет, мы рассмотрим работу схемы, начиная с восьмого импульса.

Приход восьмого импульса приводит, очевидно, первые три лампы в исходное состояние, и с правого анода $Л_3$ отрицательный импульс через диод $Д_8$ закрывает правую

половину $Л_4$, загорается неоновая лампочка с цифрой «8» в анодной цепи левого, теперь открывшегося, триода.

Следующий, девятый импульс окажет влияние только на первый пересчетный каскад — перебросит его в состояние, когда открыта левая половина лампы и горит неоновая лампочка с цифрой «1». Сумма цифр у горящих неоновых лампочек $8+1=9$ показывает число поступивших на вход декады импульсов. С приходом следующего, десятого, импульса происходит очередной переброс первого триггера и на выходе правого триода $Л_1$ возникает отрицательный импульс. Но в этот момент начинают играть роль связи: прямая — с правого анода $Л_1$ на левую сетку $Л_4$ и обратная — с правого анода $Л_4$ на левые сетки $Л_2$ и $Л_3$.

Отрицательный импульс с правого анода $Л_1$ подается на левую сетку $Л_4$ и перебрасывает четвертый триггер. На правом аноде $Л_4$ возникает отрицательный импульс напряжения, который подается по цепи обратной связи на левую сетку $Л_2$. Это нейтрализует действие прямого отрицательного импульса, попадающего через $Д_4$ на правую сетку $Л_2$, и тем самым не позволяет второму триггеру сработать от десятого импульса. Аналогично действие обратной связи на левую сетку $Л_3$, которая существует для большей надежности работы схемы.

Рассмотрим, почему четвертый триггер не срабатывает на второй, четвертый и вообще каждый четный импульс. Дело в том, что в течение первых восьми импульсов левый триод $Л_4$ закрыт и приходящий на него отрицательный импульс не может изменить состояния каскада, а положительные импульсы не пропускает диод $Д_7$. Только первый отрицательный импульс, пришедший после открывания левой половины $Л_4$, т. е. десятый импульс, способен перебросить эту ячейку в исходное положение.

Последовательное соединение двух декад дает пересчет на 100, трех — на 1 000 и т. д. Применение декадного пересчета создает большие удобства в работе и в некоторых случаях совершенно необходимо.

Декатрон и трохотрон. Специальные ионные и электронные приборы для счета импульсов появились относительно недавно. Мы рассмотрим принцип действия только двух из них — декатрона и трохотрона.

Заметим, что возможно построение пересчетных схем из одних неоновых лампочек. Недостаток неоновых лампочек, как и всех газоразрядных приборов, — их инерционность. Время деионизации, т. е. рассеивания и нейтрализа-

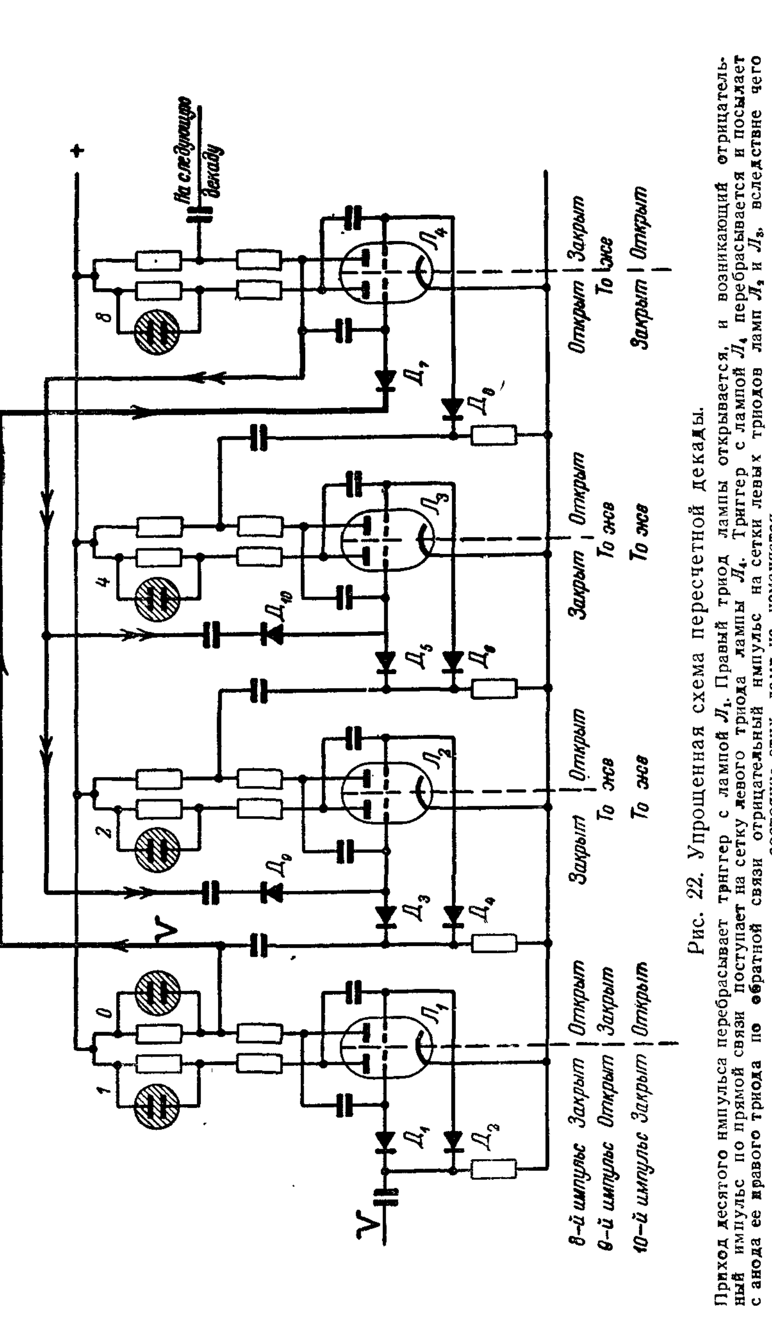


Рис. 22. Упрощенная схема пересчетной декады.

Приход десятого импульса перебрасывает триггер с лампой $Л_1$. Правый триод лампы открывается, и возникающий отрицательный импульс по прямой связи поступает на сетку левого триода лампы $Л_4$. Триггер с лампой $Л_4$ перебрасывается и посылает с анода ее правого триода по обратной связи отрицательный импульс на сетки левых триодов ламп $Л_2$ и $Л_3$, вследствие чего состояние этих ламп не изменяется.

ции ионов, возникших при разряде, составляет более 10^{-4} *сек*. Поэтому из одних газоразрядных ламп трудно получить систему, дающую несколько тысяч переключений в секунду.

Значительно меньше времени требуется для переноса светящейся ниточки газового разряда с одного электрода на соседний. Именно на этой идее переноса тлеющего раз-

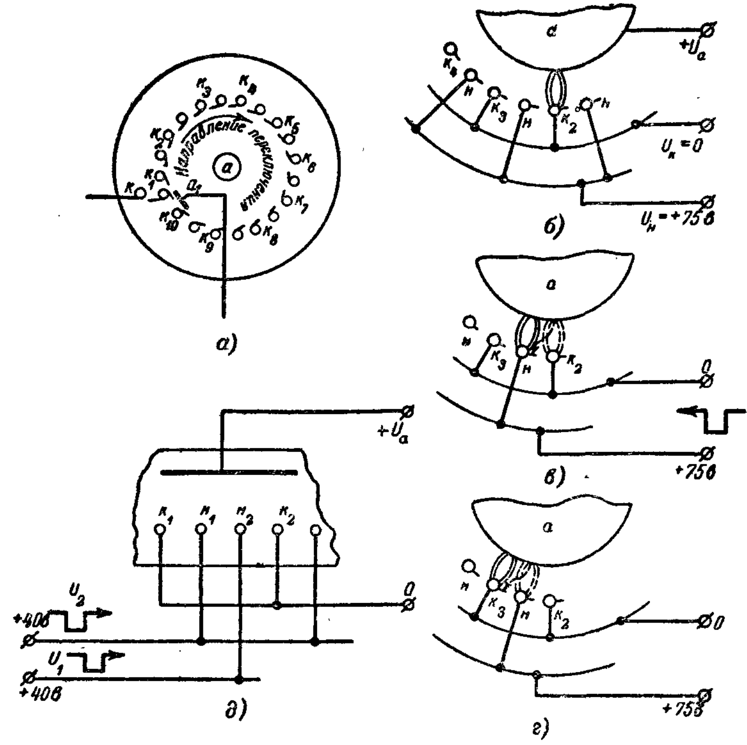


Рис. 23. Декатрон.

ряда с одного катода на другой построен декатрон. Принцип действия декатрона можно понять, рассматривая рис. 23,*а*. На нем изображен круглый анод *а*, вокруг которого на равных расстояниях расположены 20 штырьков — катодов. Из них 10 являются основными катодами $к_1$, $к_2, ..., к_{10}$ и соединены вместе одним проводом, а 10 других, стоящих в промежутках между основными, называются вспомогательными или, как их иногда называют, «завлекающими», и также соединены вместе. Форма всех электродов такая, что разряд, начавшийся на острие, переползает на круглую часть электрода. На вспомогательных электродах *н* имеется небольшой положительный потенциал, на катодах *к* — нуль. Пусть между анодом и одним из катодов ($к_2$) происходит тлеющий разряд (рис. 23,*б*). Приходит очередной отрицательный импульс на вспомогательные электроды (рис. 23,*в*), в том числе на электрод, стоящий между $к_2$ и $к_3$; тогда потенциал на нем понижается и он перехватывает разряд от катода $к_2$ на себя. Направление перехвата определяется формой электродов — выступ (острие) в сторону предшествующего электрода. По окончании импульса (рис. 23,*г*) снова катоды оказываются под более низким потенциалом, чем вспомогательные электроды, и нить тлеющего разряда перемещается еще дальше, на соседний катод $к_3$.

Для установки декатрона на нуль и для съема десятого импульса служит электрод $а_1$.

Применяя систему с двумя вспомогательными электродами $н_1$, $н_2$ между соседними катодами (рис. 23,*д*), на которые импульсы подаются с некоторым сдвигом во времени, можно получить перенос тлеющего разряда по часовой стрелке и против нее в зависимости от того, на какой вспомогательный электрод ($н_1$ или $н_2$) подается опережающий импульс (в данном случае переброс разряда идет по часовой стрелке от $к_2$ к $к_1$).

Принцип переноса тлеющего разряда с электрода на электрод, примененный в декатронах, позволил получить скорость счета до 20 000 *имп/сек* и значительно упростил схемы.

Другой тип счетного прибора, трохотрон, относится к электронно-лучевым приборам с так называемым плоским лучом, который дает «линейный след» на экране, в отличие от «точечного следа», получаемого на экране обычных электронно-лучевых трубок, имеющих осевую симметрию, так как катод выполнен в виде тонкого цилиндра. Название трохотрон связано с тем, что отдельные электроны, составляющие плоский луч, движутся по путям, имеющим форму трохоиды или циклоиды в зависимости от начальной скорости при вылете из катода. Циклоида представляет собой кривую линию, которую описывает точка на ободе колеса, центр которого равномерно передвигается по прямой линии. Если точка расположена по радиусу ближе или дальше от оси вращения, получается

соответственно укороченная или удлиненная трохоида (рис. 24,*а*). Если на электрон действуют одновременно два поля: электрическое E и магнитное H, то, как известно, первое вызывает прямолинейное движение электрона в направлении, противоположном полю E (электрон — отрицательный заряд), а второе (если электрон имел начальную скорость) вызывает движение по окружности в плоскости, перпендикулярной магнитному полю H. В результате сов-

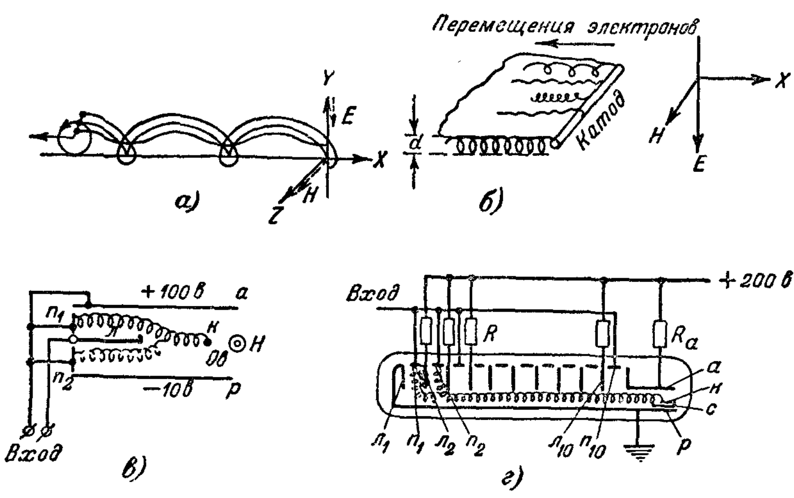


Рис. 24. Трохотрон.

местного действия взаимно перпендикулярных полей электроны движутся по трохоиде, как показано на рис. 24,*а*, в направлении, перпендикулярном обоим этим полям, т. е. вдоль эквипотенциали поля E. Если величина магнитного поля достаточно велика, то «завитки» у трохоид получаются малых размеров, и весь плоский электронный пучок будет тонким (рис. 24,*б*), например при $E \approx 100$ *в/см* и $H \approx 100$ *гс* толщина пучка d около 1 *мм*.

Тот факт, что электроны движутся вдоль эквипотенциальной поверхности, используется в трохотронах для переключения электронного пучка. Для этого необходимо создать на мгновение местное искажение электрического поля — изогнуть эквипотенциальную поверхность, вдоль которой движутся электроны, и луч перебросится в соседнюю ячейку. Переключение трохоидального луча поясняет рис. 24,*в*. Точка *к* изображает сечение тонкого цилиндрического катода, находящегося в электрическом поле между двумя электродами *а* и *р*. Магнитное поле H направлено перпендикулярно плоскости чертежа, параллельно катоду, на нас. Электрон, вылетевший из катода, движется вначале по трохоиде приблизительно параллельно электродам *а* и *р* (по эквипотенциальной поверхности, проходящей через катод). При подходе к лопатке *л* направление движения электрона будет определяться потенциалом, приложенным к ней. Если потенциал положительный, то электрон (а следовательно, и плоский луч) проходит ниже лопатки и попадает на пластину $п_2$ (показано на рис. 24,*в* пунктиром). Если теперь подать отрицательное напряжение между анодом и лопаткой *л*, то отрицательный потенциал на *л* искажает поле и заставляет трохоидальный луч пройти выше лопатки *л*. Луч, таким образом, перебрасывается в другую ячейку на пластину $п_1$.

В практических конструкциях линейного трохотрона (на рис. 24,*г*) обычно используется несколько иная система управления лучом, не с помощью лопаток, а с помощью пластин. Все лопатки соединены через сопротивления с плюсом анодного напряжения, а все пластины — с входом схемы. Когда на пластины приходит отрицательный импульс, то он выталкивает трохоидальный луч на переключающий электрод — лопатку $л_2$, так как в этот момент нулевая эквипотенциальная плоскость проходит между $п_1$ и $л_2$, ближе к последней. Возникающий в цепи $л_2$ ток создает падение потенциала на сопротивлении R, благодаря чему потенциал лопатки сильно снижается, электронный луч полностью переключается на электрод $л_2$ (начинает попадать на него с правой стороны лопатки). В этот момент отрицательный импульс заканчивается и, следовательно, потенциал пластин, в том числе и $п_2$, оказывается равным нулю. Нулевая эквипотенциаль, вдоль которой движутся электроны луча, переходит на эту пластину. Таким образом, луч переключился из нулевой в первую ячейку. Аналогично происходят перебросы луча последующими импульсами вплоть до десятого, который из ячейки № 9 выталкивает луч на анод *а*. В цепь анода включено сопротивление $R_а$, которое позволяет осуществить самовозвращение луча в нулевую ячейку, так как потенциал на аноде падает ниже, чем на соседних лопатках. При этом трохоидальный луч как бы катится вдоль рельса *р*, отталкивается лопаткой $л_1$, имеющей отрицательный потенциал, и попадает в крайнюю ячейку на пластину $п_1$.

На схеме рис. 24,*в* и *г* выходными являются электроды *k* и *a*.

Заметим только, что перескоки луча в обратном направлении исключаются механизмом автоблокировки (сопротивления в цепях лопаток), а перескок через несколько ячеек исключается выбором таких данных схемы, чтобы время, необходимое для перескока из одной ячейки в другую, было в несколько раз больше длительности импульса (0,5—1 *мксек*).

Линейный трохотрон имеет малые габариты, простую схему включения и достаточно высокую скорость счета, позволяющую отсчитывать до 300—400 тыс. *имп/сек.*

Входные и выходные каскады счетных устройств. Схемы совпадений и антисовпадений. Импульс, возникший в счетчике, подается на сетку первой лампы усилителя, который предназначен для общего усиления сигнала и довольно часто служит также для подачи (путем обратной связи) импульса отрицательного напряжения на нить счетчика для гашения разряда в счетчике. Этот усилитель большей частью оформляется в виде выносного блока газового счетчика (БГС). В задачу этого блока также входит сформировать сигнал, т. е. придать ему определенную величину. форму и длительность так, чтобы каскады пересчетного устройства могли четко функционировать (чтобы импульсы не накладывались друг на друга, чтобы величина их была достаточной для перебрасывания триггера и т. п.). Сходная задача стоит и перед выходными каскадами — нужно создать импульс, близкий к прямоугольному, определенной величины и длительности. При этом длительность выходного сформированного импульса должна значительно превосходить длительность сигнала, чтобы электромеханическая система регистратора успевала срабатывать на эти импульсы. Среди различных схем, существующих для этих целей, мы остановимся на одной, имеющей, пожалуй, наибольшее значение. Это спусковая схема с одним устойчивым состоянием, типа запертого мультивибратора.

По существу, эта схема (рис. 25) отличается от рассмотренной выше триггерной ячейки для бинарного пересчета только тем, что на сетку лампы $Л_1$ подано отрицательное напряжение U_c.

В исходном устойчивом состоянии левый триод $Л_1$ закрыт, а правый триод $Л_2$ открыт. Положительный импульс, приходящий на сетку запертой лампы $Л_1$, открывает ее, и вследствие описанного ранее действия обратных связей

схема перекидывается в другое состояние, когда левый триод открыт, а правый закрыт. Параметры схемы выбираются так, чтобы переброс схемы в другое состояние происходил быстрей, чем окончательно установятся напряжения на конденсаторах. Для этого должны быть достаточно большими емкости C_1 и C_2 и сопротивления R_1 и R_2. Тогда, так как лампа $Л_2$ закрыта, конденсатор C_2 медленно заряжается через сопротивления R_1 и R_{a2}. Зарядный ток $I_з$

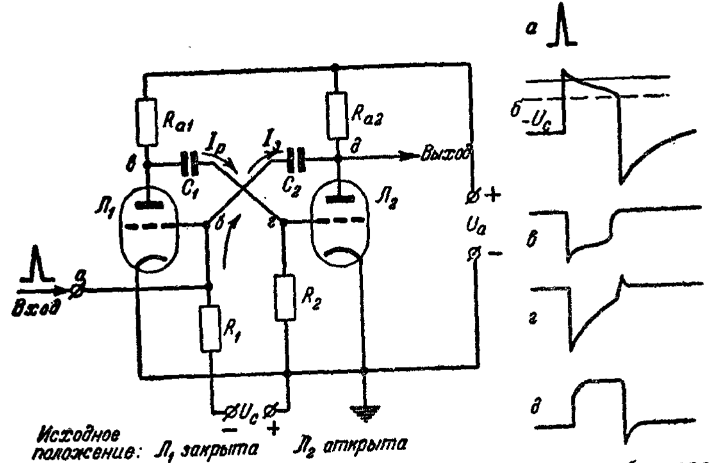


Рис. 25. Принципиальная схема запертого мультивибратора (в исходном положении $Л_1$ закрыта, а $Л_2$ открыта) и изменение потенциалов иа анодах и сетках ламп за цикл работы схемы в точках *а — д*.

при этом постепенно уменьшается, а следовательно, и потенциал на сетке лампы $Л_1$, снимаемый с сопротивления R_1, будет постепенно убывать. Это вызывает постепенное ослабление анодного тока, а следовательно, и небольшой рост потенциала на аноде $Л_1$, что слегка уменьшает разрядный ток конденсатора C_1, который разряжается в это же время через открытую лампу $Л_1$ и сопротивление R_2, разрядный ток I_p постепенно убывает, и это вызывает постепенное повышение потенциала на сетке $Л_2$. В какой-то момент потенциал на сетке $Л_2$ достигает такой величины, что лампа $Л_2$ начнет открываться. Это является толчком для перебрасывания системы в первое устойчивое положение.

Самостоятельно новый переброс во второе (неустойчивое) положение не может произойти по той причине, что

на сетке $Л_1$ имеется постоянное смещение U_c, не позволяющее подняться потенциалу сетки $Л_1$ до напряжения отпирания лампы. Таким образом, совершив один цикл, запертый мультивибратор вернулся в исходное первое устойчивое положение через строго определенное время. В таком состоянии система будет пребывать до тех пор, пока на сетку $Л_1$ не приходит новый положительный импульс, который вызывает повторение всего цикла. Подбирая значения постоянных конденсаторов и сопротивлений C_1, C_2, R_1 и R_2, можно выработать импульс, близкий к прямоугольному, желательной длительности.

Обычно в счетное устройство входит не менее двух запертых мультивибраторов: по одному во входной и в выходной цепях.

В последние годы широкое распространение стали получать схемы совпадений и антисовпадений, которые хотя и не являются непременным элементом счетных устройств, но зачастую являются крайне необходимыми (например, при исключении шумов фотоумножителей в сцинтилляционных счетчиках, исключении внешнего фона, определении направления движения частицы и др.). Импульсы, поданные на схему совпадений, создают на выходе один импульс, т. е. проходят через схему, если они пришли на вход одновременно, и наоборот, разновременные импульсы схема не пропускает.

В противоположность схемам совпадений схемы антисовпадений дают на своем выходе импульс только в том случае, если импульс в одном счетчике не совпадает по времени ни с одним импульсом в других счетчиках.

На рис. 26 представлен один из вариантов таких схем.

Действие схемы совпадений (рис. 26,*а*) сводится к тому, что два одновременно поступающих на сетки лампы $Л_1$ и $Л_2$ отрицательных импульса запирают одновременно обе эти лампы. Поэтому на их анодах резко возрастает потенциал (примерно на 100 *в*), который можно снять с общего для обеих ламп сопротивления анодной нагрузки $R_а$. Если пришел импульс на одну лампу, то эта лампа закрывается, однако большой ток через сопротивление $R_а$ от второй лампы не позволяет значительно измениться напряжению, снимаемому с $R_а$, и оно возрастает всего лишь на 1—2 *в* (это получается из строгого расчета динамического режима лампы). Таким образом, схема будет срабатывать лишь на совпадающие импульсы.

Действие схемы антисовпадений происходит следующим образом. Рассмотрим случай, когда импульсы одновременно возникают в обоих счетчиках $Сч_1$ и $Сч_2$. Тогда отрицательные импульсы поступают соответственно на сетки ламп $Л_1$ и $Л_2$, закрывают эти лампы, и на их анодах возникают положительные импульсы. Однако сопротивление $R_а$, с которого снимается выходной импульс, включено в анодную

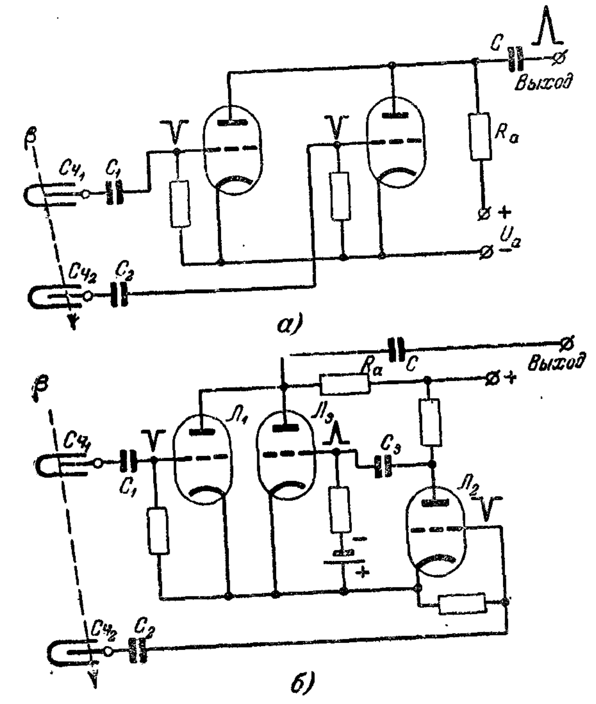


Рис. 26. Упрощенная принципиальная схема совпадений (*а*) и антисовпадений (*б*).

цепь ламп $Л_1$ и $Л_3$, которые составляют уже рассмотренную схему совпадений. Лампа $Л_3$ обычно закрыта отрицательным смещением на сетке от специальной батареи, но теперь с анода $Л_2$ приходит положительный импульс на сетку лампы $Л_3$ и открывает ее. Получается, что одновременное срабатывание двух счетчиков закрывает первую лампу $Л_1$ в схеме совпадений и открывает лампу $Л_3$, ток через сопротивление $R_а$ не меняется и, следовательно, импульса на выходе не получается.

Теперь рассмотрим случай, когда импульс возник только в счетчике $Сч_1$. Состояние лампы $Л_2$, а следовательно, и $Л_3$ не изменилось, т. е. последняя закрыта. Отрицательный импульс, пришедший на сетку $Л_1$, закрывает лампу. Таким образом, обе лампы $Л_1$ и $Л_3$ оказываются закрытыми одновременно. На их анодах потенциал резко возрастет, так как анодный ток в сопротивлении $R_а$ прекратится и, следовательно, на выходе будет получен положительный импульс. Схема антисовпадений сработала.

Наконец, рассмотрим третий случай, когда импульс возник не в счетчике $Сч_1$, а в счетчике $Сч_2$. Срабатывают лампы $Л_2$ и $Л_3$, последняя открывается положительным импульсом с анода $Л_2$. В схеме совпадений при этом обе лампы $Л_1$ и $Л_3$ оказываются открытыми—это создает незначительный по величине отрицательный импульс. Схема антисовпадений в целом не срабатывает и не создает выходного импульса. Поэтому счетчик $Сч_1$ в этой схеме является основным, а $Сч_2$—вспомогательным.

Существуют более сложные схемы, позволяющие выделять три, четыре и более совпадений одновременно и осуществлять различные комбинации совпадений и антисовпадений импульсов от тех или иных счетчиков; принцип их действия сходен с описанным выше.

ЛИТЕРАТУРА

Корсунский М. И., Атомное ядро, Гостехтеоретиздат, 1957.

Векслер В., Грошев Л., Исаев Б., Ионизационные методы исследования излучений, Гостехтеоретиздат, 1949.

Бочкарев В. и др., Измерение активности источников бета- и гамма- излучения, АН СССР, 1953.

Верховская И. И. и др., Методы меченых атомов в биологии, Изд. Московского университета, 1955.

Биркс Дж., Сцинтилляционные счетчики, Изд. иностранной литературы, 1955.

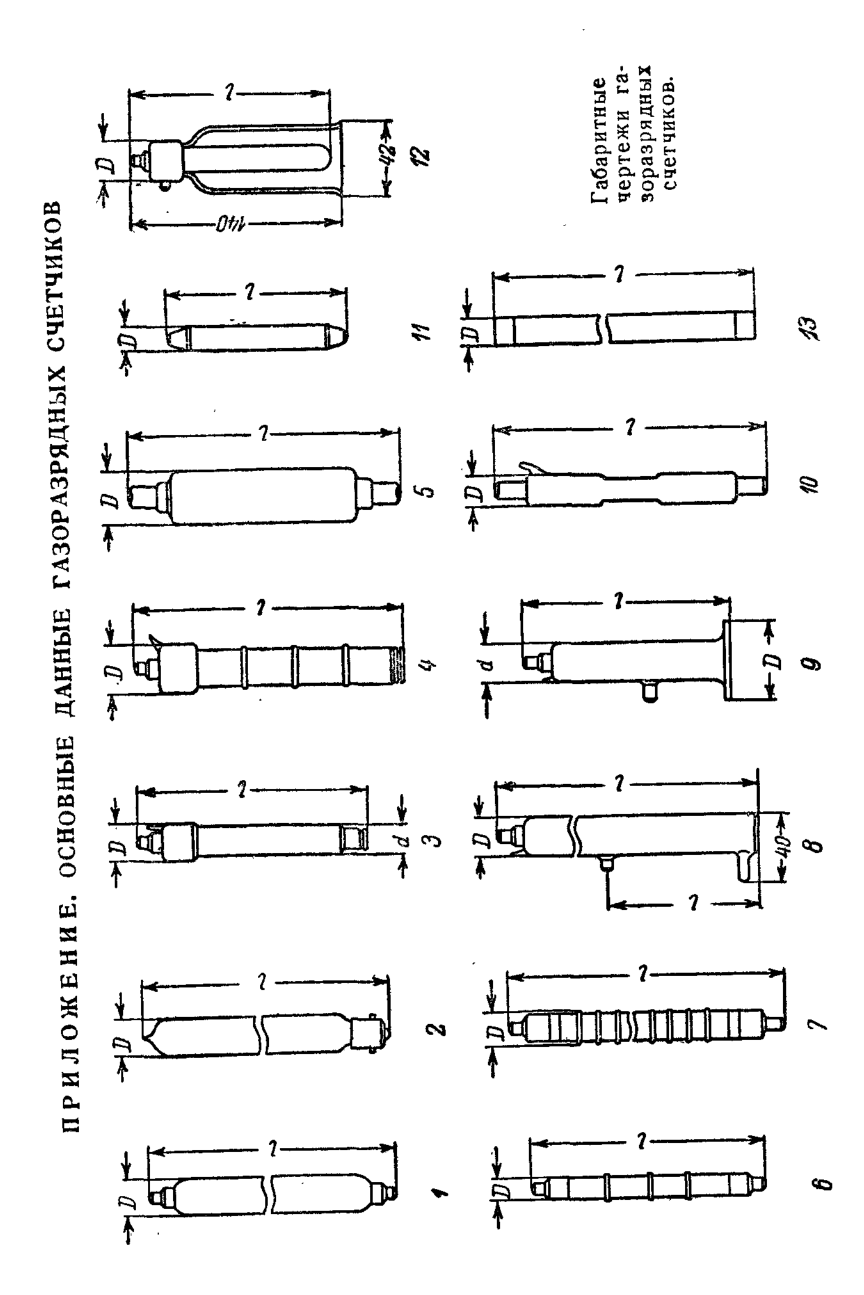
Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехтеоретиздат, 1956.

Санин А. А., Радиотехнические методы исследования излучений, Гостехтеоретиздат, 1951.

Элмор В., Сендс М., Электроника в ядерной физике, Изд. иностранной литературы, 1953.

Соминский М. С., Полупроводники и их применение, Госэнергоиздат, 1955.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКОВ



Габаритные чертежи газоразрядных счетчиков.

ТАБЛИЦА ОСНОВНЫХ ДАННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СЧЕТЧИКОВ

Обозначение	Конструкция и назначение	Напряжение начала счета НС, *в*	Ширина плато (не менее), *в*	Наклон плато (не более), %/*в*	Рекомендуемое рабочее напряжение, *в*	Натуральный (темновой) фон, *имп/мин*	Наибольшая допустимая нагрузка, *имп/мин*	Срок службы, млн. импульсов	Чувствительность счетчика[1] (не менее), *имп/мин*	Температурный диапазон работы, °С	Амплитуда импульса[2], *в*	Сопротивление изоляции цоколя, *Мом*	Вес (не более), *г*	Длина рабочей поверхности катода цилиндрического счетчика или диаметр окна торцового счетчика, *мм*	Длина *l*, *мм*	Диаметр *D*, *мм*	Толщина стенок (окна), *мг/см²*	Номер габаритного чертежа
МС-4	Цилиндрический стеклянный, самогасящийся с медным катодом (для γ-излучения)	720—780	200	0,1	НС+100	65	50 000	300	2 200	От—40 до+50	20	1 000	40	—	175	21,5	—	1
МС-6		720—780	200	0,1	НС+100	120	50 000	300	4 500	От—40 до+50	50	1 000	65	—	260	21,5	—	1
МС-7		720—780	100	0,15	НС+80	28	50 000	100	850	От—25 до+50	8	1 000	25	—	140	15	—	1
МС-8		720—780	100	0,15	НС+80	55	50 000	100	1 300	От—25 до+50	8	1 000	25	—	180	15	—	1
МС-9		720—780	250	0,1	НС+150	280	50 000	300	9 300	От—40 до+50	50	1 000	125	—	360	31	—	1
МС-11		720—780	200	0,1	НС+150	105	50 000	100	3 600	От—40 до+50	25	1 000	65	—	180	31	—	1
МС-12		720—780	100	0,15	НС+70	15	50 000	100	370	От—25 до+50	4	1 000	20	—	140	15	—	1
МС-13		720—780	200	0,15	НС+150	30	50 000	100	3 900	От—40 до+50	10	1 000	25	—	100	21,5	—	2
МС-14		720—780	200	0,1	НС+150	70	50 000	300	9 700	От—40 до+50	25	1 000	40	—	160	21,5	—	2
МС-16		720—780	200	0,1	НС+150	120	50 000	300	17 500	—	50	1 000	70	—	250	21,5	—	2
ГС-4	То же, с графитовым катодом	1 100—1 300	200	0,1	НС+150	100	—	—	—	—	—	—	35	100	175	21,5	—	1
ГС-6		1 100—1 300	200	0,1	НС+150	164	—	—	—	—	—	—	85	190	260	21,5	—	1
ГС-7		1 100—1 300	150	0,1	НС+100	53	—	—	—	—	—	—	15	70	140	15	—	1
ГС-8		1 100—1 300	150	0,1	НС+100	70	—	—	—	—	—	—	25	110	180	15	—	1
ГС-9		1 100—1 300	250	0,1	НС+150	300	—	—	—	—	—	—	150	285	360	31	—	1
ГС-10		1 100—1 300	150	0,1	НС+150	100	—	—	—	—	—	—	25	150	220	15	—	1
ГС-11		1 100—1 300	200	0,1	НС+150	148	—	—	—	—	—	—	60	110	180	31	—	1
ГС-12		1 100—1 300	150	0,1	НС+100	25	—	—	—	—	—	—	15	30	140	15	—	1
ГС-30		1 100—1 300	150	0,1	НС+150	430	—	—	—	—	—	—	200	550	652	31	—	1
ГС-60		1 100—1 300	150	0,1	НС+150	1 000	—	—	—	—	—	—	725	550	652	60	—	1
ВС-4	То же, с вольфрамовым катодом	720—800	200	0,075	НС+100	130	50 000	200	4 500	—	25	1 000	40	—	175	21,5	—	1
ВС-6		720—800	200	0,075	НС+100	180	50 000	200	8 000	От—40 до+50	30	1 000	65	—	260	21,5	—	1
ВС-8		720—800	150	0,1	НС+100	110	50 000	20	3 000	От—25 до+50	15	1 000	25	—	180	15	—	1
ВС-9		720—800	250	0,075	НС+150	380	50 000	200	18 000	От—40 до+50	65	1 000	125	—	360	31	—	1
ВС-11		720—800	200	0,075	НС+150	150	50 000	200	7 300	От—40 до+50	25	1 000	65	—	180	31	—	1
ВС-13		720—800	150	0,1	НС+100	60	50 000	100	1 500	От—40 до+50	10	1 000	25	—	100	21,5	—	2
ВС-14		720—800	200	0,075	НС+100	130	50 000	200	4 500	От—40 до+50	25	1 000	40	—	160	21,5	—	2
ВС-16		720—800	200	0,075	НС+100	180	—	200	8 000	От—40 до+50	30	1 000	70	—	250	21,5	—	2
ВС-9Т (СИ-4Г)	То же, термостойкий	720—800	200	0,1	850	380	50 000	100	18 000	От—40 до+150	—	1 000	125	—	380	31	—	1
АС-1	Цилиндрический, самогасящийся с тонким алюминиевым катодом (для β-частиц)	750—860	80	0,2	НС+80	40	—	20	—	От+5 до+35	—	—	9	—	128	17	—	3
АС-2		750—860	100	0,15	НС+100	100	—	20	—	От+5 до+35	—	—	16	—	156	24	—	4
СТС-1 (СИ-1Г)	То же, стеклянный, галогеновый со стальным катодом (для γ-излучения)	280—320	80	0,125	360—440	25	60 000	1 000	496	От—40 до+50	25	1 000	15	—	90	15,25	—	5
СТС-2		285—335	80	0,125	380—460	75	40 000	1 000	1 480	От—40 до+50	—	1 000	40	—	175	—	—	5
СТС-3		285—3[illegible]	80	0,125	380—460	130	30 000	1 000	3 280	От—40 до+50	—	1 000	65	—	260	23	—	5
СТС-8		285—335	80	0,125	380—460	110	40 000	1 000	2 560	От—40 до+50	—	1 000	45	—	215	23	—	5
СИ-1БГ	То же, со стальным спиралевидным катодом для регистрации β-γ-излучения по среднему току	375	35	1,25[3]	390	—	1,5[4]	100 *ч*	—	От—40 до+50	—	1 000	10	—	60	15	—	10
СИ-2БГ (СТС-10)		375	35	1,25[3]	390	—	50[4]	100 *ч*	—	От—40 до+50	10[5]	1 000	10	—	70	15	—	10
СТС-5	Цилиндрический, самогасящийся, галогеновый со стальным катодом (для β и γ)	280—330	80	0,125	360—440	27	—	1 000	1 446[1]	От—40 до+50	—	1 000	6	—	110	12	40—48	6
СТС-6		285—335	80	0,125	360—440	110	60 000	1 000	148 000 2 280	От—40 до+50	50	1 000	—	—	197	22	44—60	7

Продолжение таблицы

Обозначение	Конструкция и назначение	Напряжение начала счета НС, *в*	Ширина плато (не менее), *в*	Наклон плато (не более), %/*в*	Рекомендуемое рабочее напряжение, *в*	Натуральный (темновой) фон, *имп/мин*	Наибольшая допустимая нагрузка, *имп/мин*	Срок службы, млн. импульсов	Чувствительность счетчика[1] (не менее), *имп/мин*	Температурный диапазон работы, °C	Амплитуда импульса[2], *в*	Сопротивление изоляции цоколя, *Мом*	Вес (не более), *г*	Длина рабочей поверхности катода цилиндрического счетчика или диаметр окна торцового счетчика, *мм*	Длина *l*, *мм*	Диаметр *D*, *мм*	Толщина стенок (окна), *мг/см²*	Номер габаритного чертежа
МСТР-4	Торцовый, самогасящийся с медным катодом для рентгеновых лучей	1 200—1 350	200	0,05	НС+150	65	25 000	100	—	—	—	—	50	10	86	22	5,9	8
СФК-1	Счетчик фотонов для регистрации ультрафиолетового излучения открытого пламени	—	200	0,05	1 200	—	—	50	—	От—40 до+40	—	—	—	—	180	32	—	—
СГС-3	Цилиндрический, самогасящийся, галогеновый (для γ)	—	60	0,25[3]	380	—	—	—	—	От—50 до+50	—	—	—	—	55	10	—	—
СГС-4		—	—	—	340	—	50[4]	—	—	От—50 до+50	50[5]	—	—	—	38	10	—	—
СГС-5		320—440	60	0,25	380	17	0,01—50[4]	10 000	—	От—50 до+50	—	—	7,5	—	62	8	—	11
СБС-1	Цилиндрический, погружной с катодом из проводящего стекла (для β с $E_{макс} > 0{,}2$ *Мэв*)	800—1 200	150	0,03	900 (НС+50)	—	2 000	—	—	От+5 до+40	—	100	—	—	125	14	40	12
СБС-2[7]	Цилиндрический, стеклянный для регистрации β-активности газов и паров	800—2 400	400	0,03	1 200	—	—	—	—	—	—	—	—	200	362	19—23	—	—
СБС-3[7]		800—2 400	400	0,03	1 200	—	—	—	—	—	—	—	—	100	265	19—23	—	—
СБМ-7[7]	То же, с катодом из нержавеющей стали	800—2 400	200	0,05	1 300	—	—	—	—	—	—	—	—	160	335	26	0,2	—
СБМ-8[7]		800—2 400	200	0,05	1 300	—	—	—	—	—	—	—	—	160	235	26	0,2	—
СБТ-3	Торцовый (для β)*	—	100	0,05	2 000	—	—	100	—	От—30 до+30	—	—	—	50	—	—	3—7	9
СБТ-8	То же	1 100—1 700	150	0,05	1 300	30—45	10 000	100	—	От—30 до+30	—	10 000	30	20	—	—	3	—
СБТ-7	То же, галогеновый	320—420	80	0,125	380	35	50 000	10 000	—	От—40 до+50	20	1 000	25	18	72	31	3	9
МСТ-17	Торцовый, самогасящийся с медным катодом (для β)	—	150	0,05	—	25	30 000	50	—	—	—	1 000	25	20	100	40	5	9
МСТ-18 (СИ-3Б)		1 200—1 650	150	0,03	1 400	25	—	60	—	От—20 до+40	—	1 000	—	—	—	18	3	9
СИ-2Б (ПСТ-40)	То же, со стеклянным катодом	1 350—1 750	150	0,05	1 800	65	10 000	100	—	От—30 до+50	—	1 000	37	40	90	62	3—5	9
Т-25-БФЛ	То же, с медным катодом (для β и α)	1 250	250	0,015	1 350	30	—	500	—	От—30 до+40	—	—	—	—	—	25	1—2,5	9
САТ-3	Торцовый, пропорциональный (для α-частиц)	—	—	—	800	—	—	—	—	—	1[8]	—	—	26	—	—	3	9
САТ-4		—	—	—	800	—	—	—	—	—	1[8]	—	—	4,5	—	—	1,2	—
САТ-5		—	—	—	1 600	—	—	—	—	—	1[8]	—	—	2,8	—	—	1,2	—
САТ-8		—	—	—	1 000	—	—	—	—	—	50[8]	—	—	4	—	—	1,2	—
САТ-7	То же, с галогеновым наполнением	330—460	60	—	360	0,125[6]	—	200*ч*	—	—	40[8]	1 000	—	25	70	44	3	9

Обозначение	Конструкция и назначение	Напряжение начала счета НС, *в*	Ширина плато (не менее), *в*	Наклон плато (не более), %/*в*	Рекомендуемое рабочее напряжение, *в*	Натуральный (темновой) фон, *имп/мин*	Температурный диапазон работы, °C	Амплитуда импульса[2], *в*	Сопротивление изоляции цоколя, *Мом*	Длина рабочей поверхности катода цилиндрического счетчика или диаметр окна торцового счетчика, *мм*	Диаметр D, *мм*	Толщина стенок (окна), $мг/см^2$	Номер габаритного чертежа
СНМ-3 1900	Цилиндрический, самогасящийся	—	100	0,05	800	—	—	1[8]	—	80	18	230[9]	13
СНМ-4 1200	для нейтронов с наполнением трех	—	100	0,05	1 900	—	—	1[8]	—	210	34	600[9]	13
СНМ-4	фтористым бором	—	100	0,05	1 200	—	—	1[8]	—	210	34	230[9]	13
СНМ-5		1 100—1 800	100	0,05	1 400	2—10	От—20 до+30	1[8]	10 000	185	35	230[9]	13
СНМ-7		—	100	0,05	2 000	—	—	1[8]	—	550	35	600[9]	13
СНМ-8	То же, обогащенный изотопом бора-10	—	150	0,05	1 700	—	—	1[8]	—	942	35	400[9]	13
СНМ-9	Катод покрыт слоем бора	—	400	0,10	1 300	—	—	50[8]	—	77	18	—	13

[1] Чувствительность счетчика выражается числом регистрируемых им в единицу времени импульсов при установленной интенсивности облучения и рабочем напряжении. Для счетчиков МС-4, 6, 7, 8, 9, 11 и 12, ВС-4, 6, 8, 9 и 11 установлена интенсивность облучения 0,1 *микрорентген/сек*, для МС-13, 14 и 16, ВС-13, 14 и 16—0,0*микрорентген/сек*, для СТС—1 и 200 *миллирентген/ч* (соответственно в таблице даются два значения).

[2] Максимальное значение изменения напряжения между электродами в течение разряда при начальном напряжении, равном наибольшему рекомендуемому напряжению счетчика, и при средних скоростях счета.

[3] Крутизна вольт-амперной характеристики (изменение среднего тока в процентах при изменении питающего напряжения на 1 *в* при постоянном облучении).

[4] Наибольшая мощность дозы (рабочее облучение) в *рентген/ч* при измерениях (перегрузочное облучение в 3 раза больше).

[5] Рабочий ток в *мка*.

[6] Фон для α-счетчиков определяется случайными импульсами, величина которых порядка величины импульсов от α-частиц.

[7] При перенаполнении счетчиков допускают прогрев до 300° С (внешний вид на рис. 5, *г*).

[8] Чувствительность регистрирующей схемы в *мв*.

[9] Давление трехфтористого бора в *мм рт. ст.*

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.

Сайт старой технической литературы:
http://retrolib.narod.ru
http://retrolib.msevm.com

С уважением,
Архивариус